

分类号

密级

UDC



北京理工大学
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY

博士学位论文

光学系统的智能化设计
优化方法的研究

程雪岷

导师姓名(职称) 王涌天(研究员) 答辩委员会主席 金国藩(院士)
郝群(教授)

申请学科门类 工 学 论文答辩日期 2004. 2. 25

申请学位专业 光 学 工 程

2004年1月9日

附件:

研究成果声明

本人郑重声明: 所提交的学位论文是我本人在指导教师的指导下进行的研究工作获得的研究成果。尽我所知, 文中除特别标注和致谢的地方外, 学位论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果, 也不包含为获得北京理工大学或其它教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的合作者对此研究工作所做的任何贡献均已在学位论文中作了明确的说明并表示了谢意。

特此申明。

签名: 程书敏 日期: 2004. 1. 3.

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解北京理工大学有关保管、使用学位论文的规定, 其中包括: ①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件; ②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文; ③学校可允许学位论文被查阅或借阅; ④学校可以学术交流为目的, 复制赠送和交换学位论文; ⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容 (保密学位论文在解密后遵守此规定)。

签 名: 程书敏 日期: 2004. 1. 3

导师签名: 王涌天 日期: 2004. 1. 5

目 录

摘要	IV
Abstract	VI
第一章 绪论	1
1.1 光学设计的优化概念	1
1.1.1 光学设计的基本步骤	1
1.1.2 优化理论	2
1.1.3 光学系统优化概念	3
1.2 光学优化算法	4
1.2.1 阻尼最小二乘法	4
1.2.2 适应法	6
1.3 光学设计全局优化算法	6
1.3.1 模拟退火算法	6
1.3.2 遗传算法	8
1.3.3 全局搜索法	10
1.4 现有光学设计软件	10
1.5 变焦距系统设计	11
1.6 本论文的研究动机和目标	12
1.7 本论文的主要内容	13
第二章 基于逃逸函数的复杂光学系统全局优化算法	15
2.1 逃逸函数算法	15
2.2 阻尼最小二乘法优化效率的提高	17
2.3 逃逸函数控制参数的选取	24
2.4 逃逸函数算法的程序实现	29
2.5 设计实例	30
2.6 本章小结	32
第三章 优化进程中自动增减光学元件的机制	33
3.1 遗传算法和零光焦度算子	33

3.2 光学元件的自动增减机制	35
3.2.1 镜头形态参数 W 和 S	36
3.2.2 增减光学元件的判据和策略	39
3.2.3 增减光学元件机制的程序实现	39
3.3 设计实例	40
3.3.1 自动增加元件	40
3.3.2 自动分离双胶合	44
3.3.3 自动删除光学元件	51
3.4 光学元件增减机制对光学系统制造性能的改善	53
3.4.1 广角镜头公差分析	53
3.4.2 照相物镜分析	54
3.4.3 变焦系统分析	56
3.5 本章小结	57
第四章 基于神经网络的对玻璃类离散变量的优化模型	58
4.1 遗传算法的应用	58
4.2 神经网络优化模型	59
4.2.1 神经网络算法	59
4.2.2 玻璃优化到神经网络的映射	61
4.2.3 小型玻璃库	63
4.2.4 程序实现	65
4.3 设计实例	66
4.4 本章小结	68
第五章 变焦镜头初始结构专家系统	69
5.1 变焦光学系统设计的发展历史	69
5.1.1 传统变焦光学系统的类型	69
5.1.2 变焦光学系统组元运动曲线计算方法	73
5.2 多组元全动型变焦系统初始结构自动生成的专家系统	76
5.2.1 高斯参数的优化方法	76
5.2.2 专家系统——组元结构自动生成	78

5.2.3 变焦系统初始结构专家系统的程序实现	79
5.3 设计实例	80
5.3.1 变焦照相镜头	80
5.3.2 大变倍比变焦镜头	83
5.4 本章小结	85
第六章 结论与展望	86
参考文献	89
攻读博士学位期间发表论文、参加科研项目及获奖情况	96
致谢	98

摘 要

光学系统的智能化设计优化方法研究旨在逐渐减少设计工作对设计者经验的依赖,提高设计工作的效率和设计结果的质量,对我国光学工业和国防建设的发展具有重要的理论意义和实用价值。本文针对该领域中的全局优化算法、玻璃类离散变量优化方法、在优化进程中自动增减光学元件的机制、以及变焦镜头初始结构的自动生成方法等热点问题开展了研究工作。

对基于逃逸函数的全局优化算法进行了深入研究,探讨了提高其优化效率、使其达到实用化的方法。针对这种全局优化的运行是由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成的特点,提出了寻找最佳阻尼因子和最优解向量长度两个搜索机制,有效地提高了各个局部优化的效率;通过大量实验确定了逃逸函数中的控制参数的最佳取值,保证了逃逸过程的高效高速。在算法研究的基础上,成功地研制了国内第一个实用化的复杂光学系统全局优化模块。

为进一步实现真正意义上的智能化全局优化,提出了国际上第一个不含随机性算法的可以在光学系统的优化进程中根据需要自动增减光学元件的机制,采用镜头形态参数 W 和 S 做为判据,通过分析原有设计中的“内应力”,在合理的位置插入新的光学元件;通过分析各元件在系统中承担的光焦度和对像差平衡的必要程度,自动找到和去除其中的冗余。对大量光学系统进行了实验设计,验证了该机制的可行性。

为解决光学设计中玻璃类离散变量的优化问题,建立了基于神经网络的玻璃类离散变量的优化模型。当采用指定的玻璃品种且系统色差满足要求时,神经网络优化模型的能量函数取极小值,从而实现了玻璃材料的智能化选取。建立了基于中国玻璃牌号的小型玻璃库,大大减少了网络中神经元总数,提高了优化的收敛速度。通过设计实例验证了算法的可行性。

建立了可以自动生成变焦光学系统初始结构的专家系统。提出了对包括多组元全自动型复杂变焦方式在内的各种变焦镜头的高斯光学参数的自动优化设计方法;通过对现有变焦距光学系统专利的分析,构造了含有众多实用镜头组元的数据库,建立的专家系统可以根据高斯光学设计中对各组元视场、孔径的要求,从数据库中自动选取合适的镜头组元结构。设计实例表明本专家系统可以根据变焦系统的光学特性要求,自动生成多种不同的初始结构供设计者参考。

关键词：光学设计，智能化 CAD，全局优化，自动增减光学元件，神经网络算法，变焦镜头，专家系统

Abstract

The research on intelligent computer-aided design (ICAD) of optical systems aims to gradually reduce the dependence of optical design on the designers' experience, improve the efficiency of the design work and the quality of design results. This thesis studies some of the key techniques for ICAD of optical systems, including global optimization, automatic element addition and deletion in the course of optimization, glass optimization using neural network and expert system for zoom lens design, etc.

Efforts are made to improve the efficiency of the escape function algorithm for global optimization. This type of global optimization consists of many local optimization runs with or without the escape function using the damped-least-squares (DLS) method. Two search schemes are proposed to raise the convergence speed of the DLS method, which searches for the best damping factor and the optimum length of the solution vector respectively. Experiments are also made to determine the optimum default values for the control parameters of the escape function. The algorithm is successfully implemented in the GOLD program, which becomes the first optical software in China with a practical global optimization feature for the design of complex optical systems.

In order to further improve the intelligence of the computer-aided design, a scheme is established for the automatic addition and deletion of optical elements during the course of lens optimization. The criteria used in the scheme are two lens form parameters W and S , quantifying the symmetry of the optical system and the optical power distribution among the individual lens elements. The scheme is capable of selecting the 'best' position for adding an optical surface or element when it is needed to overcome the stagnation of an optimization process, and of observing and deleting a redundant element automatically without impairing the performance of the system. Design examples are provided that demonstrate the practicability of the scheme.

The possibility of using neural network to handle discrete variables (glass materials) in lens design is investigated. A neural network model for glass optimization is designed such that a minimum of the network energy function corresponds to a design result with acceptable chromatic aberrations and with a proper combination of selected real glasses. 21 recommended Chinese optical glasses are selected to form a small catalog for the neural network model to reduce the number of the neurons and increase the convergence rate of optimization. As an example, a double Gauss camera lens is successfully optimized with the model.

Zoom lenses are receiving more and more applications in optical products, yet they are difficult to design. To alleviate the problem, an expert system for the automatic generation of the initial layout of a zoom lens is set up. It includes the development of optimization algorithms to determine the Gaussian parameters for different zoom mechanisms, and the establishment of a lens group database from which the structure of each lens group in a zoom system can be selected according to its numerical aperture, field of view and other specifications. Design examples are given, which show that the expert system is capable to

provide various initial layouts of a zoom lens according to its optical specifications.

Key words: optical design; ICAD; global optimization; automatic optical element addition or deletion; neural network; zoom lenses; expert system

第一章 绪论

光学设计^{[1]-[10]}是物理学最古老的分支之一，其历史可以追溯到三个世纪前。早期的开拓者们通过制作及测试实际光学系统的方式积累设计经验，再用这些经验指导系统的修正和改进。十九世纪，随着光学面曲率半径和介质折射率的精确测试方法的出现，使人们得以在光学设计中利用光线计算方法，通过追迹一定数量的光线即可准确地了解光学系统成像特性；但由于光线追迹需要大量的浮点运算，它在光学设计中的广泛应用是在 1946 年第一台电子计算机诞生之后。人们从理论研究和实践经验中早已认识到，像差为零的光学系统是难以实现的，通常也是没有必要的，实际可行的方法是令像差达到有限极小和最佳平衡。随着计算能力的迅速提高，开始采用各种优化方法来解决光学设计问题，自 60 年代起在大型计算机上开发了各种基于 FORTRAN 的光学设计优化程序^{[11][12]}。在微机出现之前，只有经验丰富的专家才能够从事光学设计。现在，廉价的微机和强大的商品化光学 CAD 软件正在逐步实现光学设计的普及化，使非光学专业的技术人员经过适当培训也能够从事这项工作。今天，人们仍在不断深入地研究智能化的光学设计方法，包括优化算法的完善和专家系统的建立，以便逐渐减小其对设计者经验的依赖。

本章从光学设计和优化基本概念出发，对现有的阻尼最小二乘法、遗传算法、全局搜索和模拟退火等光学系统优化算法进行综述，并分析了变焦系统设计的现状，最后介绍了论文的研究动机和基本内容。

1.1 光学设计的优化概念

1.1.1 光学设计的基本步骤^{[13][14]}

现代光学设计通常采用下列步骤：

定义：光学设计者根据系统总体的性能要求，提出光学系统的光学特性参数和成像质量标准；

预设计：确定光学系统类型（折射、反射、折反射）、元件大致数目和尺寸要求；

初始系统选择及分析：查询现有资料或数据库中的相关光学系统，从中选取合适的初始系统，并对该初始结构进行分析；

优化：根据结构分析结果，定义优化变量（光学面的曲率、相邻两面的轴向间距、

光学玻璃材料等等)、评价函数(成像质量评价指标,零值对应无像差)和边界条件(限制变量和系统特性参数变化的约束)等;其中的玻璃材料在优化中通常转换为折射率和色散系数等连续变量,为使变量的取值与实际玻璃值接近,在优化过程中将用适当的边界条件将其变化控制在合理的范围内,并适时进行玻璃材料替换;优化中采用数学(数值)方法来改变上述变量,在满足边界条件的前提下实现评价函数最小化;

结果分析:优化进程找到光学系统评价函数极小后,根据光学系统的性能要求,采用相应的评价方式分析其成像质量;如果不满足要求,需要调整优化控制参数或重新选择初始结构;

加工辅助:得到满足设计要求的光学系统后,需对其制造的可行性进行分析,其中包括对材料、加工、装配误差进行公差分配。

可以看出,虽然功能日益强大的光学 CAD 软件已成为现代光学设计不可或缺的工具,但成功的光学设计仍然要求设计者掌握光学设计的像差理论,了解各种光学系统的像差特性和设计方法,在初始结构的正确选取和优化进程的合理控制等方面,设计者的经验仍然起着十分重要的作用。

1.1.2 优化理论

优化是在给定条件下获得最好结果的行为,而所期望结果可表示为一些决策变量的特定函数,故优化可定义为寻找给定函数取极值的条件的过程^{[15][16]}。

优化方法的数学建模一般定义为:

$$\begin{aligned} \text{最小化} \quad & \Phi(\mathbf{X}); \\ \text{边界条件} \quad & g_i(\mathbf{X}) = b_i; \quad i = 1, 2, \dots, I \\ & h_j(\mathbf{X}) \leq c_j \text{ 或 } h_j(\mathbf{X}) \geq c_j; \quad j = 1, 2, \dots, J \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 $\mathbf{X}$ 为系统结构参量(优化变量)向量, $\Phi(\mathbf{X})$ 为评价函数, $g_i(\mathbf{X})$ 、 $h_j(\mathbf{X})$ 为边界条件函数, I 为等式边界条件的总数, J 为不等式边界条件的总数。

评价函数表达设计者所期望结果,从数学角度而言,评价函数应满足以下条件:

- 连续;
- 对所有优化变量均可微;
- 易于计算。

为此在优化中常用的评价函数 Φ 为 Legendre 所提出的形式:

$$\Phi = (\omega_1 \cdot f_1)^2 + (\omega_2 \cdot f_2)^2 + \dots + (\omega_m \cdot f_m)^2 \quad (1-2)$$

其中 $(f_1, f_2, \dots, f_m)$ 为一组表达系统优化目标的函数, $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$ 为正值权因子序列, 此评价函数中各项为正值, 当其趋近于极小值时, 则表示性能指标趋近于目标值。通常优化为多次迭代过程, 上次迭代结果作为下次迭代的初始结构, 以逐渐逼近评价函数极小。

1.1.3 光学系统优化概念^{[17]~[20]}

光学设计中的优化以使系统满足一定的成像要求为基本目的。光学系统中常见的结构参量为各个光学面的曲率半径、相邻两面的轴向间距、介质的折射率与色散系数等等, 假设其中有 N 个需要优化的结构参量 $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 。

了解光学系统成像性能的最直接的方法是光线追迹。设点 $I(X_I, Y_I)$ 为从某一物点出发通过系统入瞳中心的主光线在像面上的交点, 点 $R(X_R, Y_R)$ 为从该物点出发的其它光线在像面上的交点, 则两个方向的垂轴像差可以定义为:

$$G(x_1, x_2, \dots, x_N) = X_R - X_I \quad (1-3)$$

$$H(x_1, x_2, \dots, x_N) = Y_R - Y_I \quad (1-4)$$

对于理想成像系统, 从一个物点出发的全部光线应会聚在像面上对应的像点上, 即垂轴像差全部为 0。在评价实际光学系统时, 通常从物面的几个抽样点各自追迹一组抽样光线, 因此最简单、最直观的优化评价函数可定义为各条抽样光线的垂轴像差的加权平方和:

$$\Phi = \sum_i [(\omega_{G_i} G_i)^2 + (\omega_{H_i} H_i)^2] \quad (1-5)$$

如用符号 f 来统一表示像差项, 则上式进一步简化为:

$$\Phi = \sum_i \omega_i^2 f_i^2(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (1-6)$$

优化计算在寻找 Φ 的最小值的同时需满足一组用公式(1-1)描述的边界条件。最常见的边界条件对系统的焦距、后工作距、出瞳距、轴外视场畸变等提出要求, 此外还要保证系统具有可加工性: 相邻光学元件的间距为正、元件中心厚度和边缘厚度满足加工要求、材料变量的取值与实际玻璃值接近等等。

由上述分析可知, 光学系统优化同样是在边界条件的约束下以评价函数最小化为目标。由于(复杂)光学系统通常具有较多的待优化的结构参量, 其中既有连续变量又有离散变量, 像差是变量的非线性函数且无法找到解析表达式, 各像差间一般无正交关系, 由像差值构成的评价函数在结构变量的多维空间具有为数众多的局部极小, 因此光学系统的优化是一个至今没有解决好的复杂问题^{[21]~[25]}。

1.2 光学优化算法^[26]

在 60~70 年代, 人们在光学设计中尝试过多种优化方法, 如梯度法、最速下降法、逐个变量的一维寻查、最小二乘法等等。时至今日, 在众多光学设计软件中广泛应用的是阻尼最小二乘法 (Damped Least Squares, DLS), 适应法也在一定范围得到使用。

1.2.1 阻尼最小二乘法

像差 f_i 和评价函数 Φ 是结构参量 $(x_1, x_2, \dots, x_N)$ 的复杂非线性函数。为便于求其极小值, 在初始结构参数 $(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0)$ 附近把 f_i 按泰勒级数展开, 并只取到线性项:

$$f_i(x_1, x_2, \dots, x_N) = f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0) + \sum_{j=1}^N \frac{\partial f_i}{\partial x_j}(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0) \cdot (x_j - x_j^0) \quad (1-7)$$

式中 x_j^0 是初始结构参数, x_j 是迭代后系统的结构参量值, $\partial f_i / \partial x_j$ 为第 i 种像差对于第 j 个结构参量的变化率, $i = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N$ 。将 $(x_j - x_j^0)$ 记为 Δx_j , $\partial f_i / \partial x_j(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0)$ 记为 $(\partial f_i / \partial x_j)^0$, $f_i(x_1^0, x_2^0, \dots, x_N^0)$ 表示为 f_i^0 , 则式(1-7)可以表示为:

$$f_i = f_i^0 + \sum_{j=1}^N \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j} \right)^0 \Delta x_j \quad (1-8)$$

考虑(1-6)式表示的评价函数中权因子的影响, 并以矩阵形式表示:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^0 + \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} \quad (1-9)$$

其中 $\mathbf{F} = [\omega_1 f_1, \omega_2 f_2, \dots, \omega_M f_M]^T$, $\mathbf{F}^0 = [\omega_1 f_1^0, \omega_2 f_2^0, \dots, \omega_M f_M^0]^T$, 矩阵 $\mathbf{A}$ 中的每一个元素为 $a_{ij} = \omega_i (\partial f_i / \partial x_j)^0$, $\Delta \mathbf{X} = [\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_N]^T$ 。根据多元函数极值理论, 评价函数 Φ 取极值的必要条件为 $\partial \Phi / \partial x_j = 0$, 因此有:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \Delta \mathbf{X} + \mathbf{A}^T \mathbf{F}^0 = 0 \quad (1-10)$$

当 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 可逆时, (1-10) 式有解:

$$\Delta \mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}^0 \quad (1-11)$$

这即为最小二乘法, 此方法以线性函数近似实际的像差函数。当在初始结构参数附近区域像差函数(评价函数)随变量的变化呈高度非线性时, 以上线性处理的误差很大。在解方程组时, 可能出现矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的行列式值 $|\mathbf{A}^T \mathbf{A}|$ 很小的情况, 则由(1-11)式所得的解向量长度很大, 远远超过像差函数的线性范围, 造成评价函数发散。

为使最小二乘法在非线形严重时仍然有效, 需对它的解向量长度加以控制, 使之在迭代过程中处于线性范围内。为此 Wynne 和 Wormell^[27] 提出采用阻尼最小二乘法, 在(1-6)式定义的评价函数的中加入 Δx 的平方和项:

$$\Phi = \sum_{i=1}^M \omega_i^2 f_i^2 + D \sum_{j=1}^N \Delta x_j^2 \quad (1-12)$$

其中 D 为阻尼因子。当对新的评价函数做最优化处理时, 被减小的不仅是像差函数, 还有 Δx 本身。 Δx 将减小的程度由 D 的大小决定, D 起着控制解向量长度的作用。

同样根据多元函数极值理论, 对(1-12)式中的评价函数求极小值, 可得到:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{F}^0 + (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + D\mathbf{I}) \Delta \mathbf{X} = 0 \quad (1-13)$$

其中 $\mathbf{I}$ 为 N 阶单位矩阵, 则阻尼最小二乘解为:

$$\Delta \mathbf{X} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A} + D\mathbf{I})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}^0 \quad (1-14)$$

在每次迭代后, 建立海赛矩阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$, 把阻尼因子 D 加到对角线上的各项, 构成 $\mathbf{A}^T \mathbf{A} + D\mathbf{I}$; 然后解该正规方程组, 可求得结构变量的变化量矩阵。阻尼最小二乘法采用阻尼因子 D 控制解向量长度, 通过选择适当的阻尼因子, 解决了像差函数的非线性问题, 令评价函数从初始点快速收敛到局部极小; 且只要阻尼因子 D 非零, 正规方程组(1-13)式有解; 而且在该算法中像差个数不受限制, 可以把对边界条件的要求做为惩罚函数纳入评价函数。

但用阻尼最小二乘法优化得到的结构一般不是系统的最佳设计, 而是评价函数在结构变量空间的局部最优解。通常此解与初始结构相近, 若初始点选择不合适, 则该算法将无法跳出局部极值。此外, 虽然引进的阻尼因子改善了最小二乘法的收敛性, 但若阻尼因子选择不适当, 将直接影响到算法的收敛性^{[28]~[32]}。

1.2.2 适应法

适应法的思想是优先改变那些最有效的结构参量^[6], 使系统达到校正时, 结构变量的改变量尽可能小。令 $\Delta \mathbf{F} = [f_1 - f_1^0, f_2 - f_2^0, \dots, f_M - f_M^0]^T$, 则像差方程组表示为:

$$\mathbf{A} \Delta \mathbf{X} = \Delta \mathbf{F} \quad (1-15)$$

适应法的应用前提是像差数小于自变量数: 在优化方程组中的方程式个数小于自变量数; 方程组为不定方程组, 因而有无穷多解, 为使像差方程与变量之间符合线性关系, 选用解向量模为最小的那组解。即在满足像差方程组的条件下, 求取 $\sum \Delta x_j^2$ 的极小值解。从数学角度来说, 这是一个约束极值问题, 因此可利用拉格朗日乘子法求解:

$$\sum \Delta x_j^2 + \lambda^T (\mathbf{A} \Delta \mathbf{X} - \Delta \mathbf{F}) = 0 \quad (1-16)$$

式中 λ 为拉格朗日乘子向量。则所要求的约束极值的解为 $\Delta \mathbf{X} = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} \Delta \mathbf{F}$ 。适应法所求解的存在条件是矩阵 $(\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1}$ 存在, 因此要求像差线性方程组的系数矩阵 $\mathbf{A}$ 不发生行相关, 即参加校正的像差不能相关。在适应法中, 使用者必须慎重选定参加校正的像差, 不仅要避免出现像差相关, 而且所选择的各项像差应能全面准确地反映系统的成像质量, 这对设计者的经验提出了一定的要求。

1.3 光学设计全局优化算法

阻尼最小二乘法 and 适应法可以在光学系统结构参量的多维非线性空间中对评价函数进行优化。但得到的优化结果往往并非最优值, 而只是一个局部极小, 其最后的设计结果在很大程度上仍取决于初始结构的选择。近年来随着计算机计算能力的迅速提高, 人们开始探讨各种在光学设计中采用全局优化算法^{[33]~[45]}, 使优化进程可以自动跳出局部极小, 继续在解空间的其它部分寻找更佳的结构。目前讨论较多包括模拟退火算法^{[46]~[48]}、遗传算法和全局搜索法。

1.3.1 模拟退火算法

模拟退火算法基于统计力学和热力学理论, 最早由 Metropolis 提出^[49], 该算法模拟一定温度时物质的能态分布。其基本思想为: 把自变量向量 $\mathbf{X}$ 看成物质的微观状态, 其评价函数值 $\Phi(\mathbf{X})$ 对应物质的能量值, 则物质能量最小时所找到的为全局 (或近似) 最优解; 用控制参数 T 类比退火温度, 让 T 从一个足够高的值慢慢下降, 对每个 T 用

Metropolis 抽样法在计算机上模拟物质在此温度下的热平衡态, 即对当前微观状态 X_0 作微小随机扰动以产生一个新状态 X_1 , 并计算系统能量的变化 ΔE 。若 $\Delta E \leq 0$, 则接受当前变化量, 并把改变后的系统作为下一步的初始点。 $\Delta E > 0$ 时, 系统用(1-17)式计算的概率来判断是否接受此变化, 其判断值为 $[0,1]$ 间均匀分布的一个伪随机数 χ 。

$$P(\Delta E) = \begin{cases} 1, & \Phi(X_1) < \Phi(X_0) \\ \exp\left(\frac{-\Delta E}{k \cdot T}\right), & \Phi(X_1) \geq \Phi(X_0) \end{cases} \quad (1-17)$$

(1-17)式定义玻尔兹曼分布定律, k 为玻尔兹曼常数, T 为当前温度。若随机数 χ 小于概率 $P(\Delta E)$, 则保留该新系统; 反之则回到原始系统来启动下一步。经过一定次数的搜索, 认为系统在此温度下达到平衡, 则降低温度 T 再进行搜索, 直到满足结束条件, 如图 1-1。

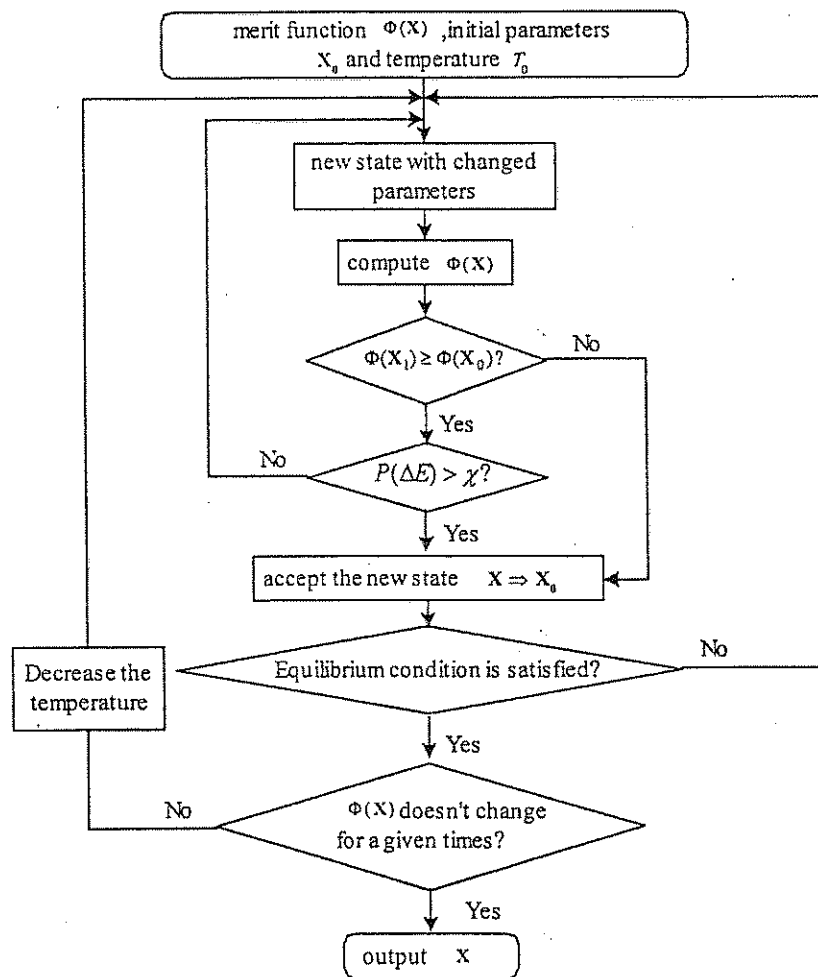


图 1-1 模拟退火算法的流程图

该算法在寻找最小值的过程中,采用随机扰动的方式改变系统状态,并以一定的概率允许系统变坏,由此可以引起评价函数的上升和下降,有可能跳出局部极值,是一种全局优化算法^{[50]~[53]}。模拟退火算法无需依赖相关领域知识来提高算法的性能,无需人工干预,自动化程度高。但在优化结构变量较多的实际光学系统时,该算法的致命缺点是效率低、收敛速度慢。

1.3.2 遗传算法

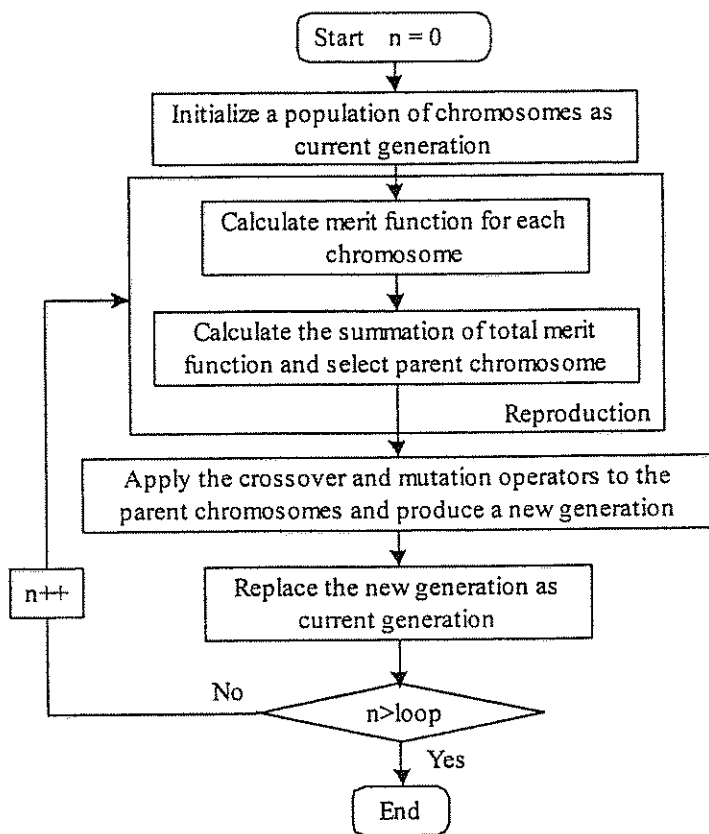


图 1-2 遗传算法的流程图

遗传算法的最早雏形出现在生物学家 Fraser 的论文中^{[54][55]}, 试图模拟选择、交配、突变等生物种群对环境自适应的进化过程, 通过“优胜劣汰”以及“遗传突变”来实现优化。到 70 年代, Holland 教授提出的遗传算法的基本原理—模式定理^[56], 从理论上论证遗传算法可以用来寻求最优可行解。其常用形式由 Goldberg^[57] 提出, 与传统搜索算法的差异在于不依赖于原有设计结构, 由一组随机产生称为“种群”的初始解开始搜索。种群中每个个体是问题的一个解, 称为“染色体”。染色体被编码成一串字符串, 所有字符串组成一代。用“适度函数值”来评价所有的染色体, 对其进行选

择、杂交和突变操作，生成的下一代染色体称为“后代”。后代形成后，再从中选择适度函数值高的染色体并替换部分染色体，进入下一代繁衍。经过若干代的繁衍，算法收敛于最好的染色体，它可能就是问题的最优解或者近似最优解^{[58]-[60]}。遗传算法的流程图如图 1-2。

为将之用于光学设计优化^{[61][62]}，Moore^[63]提出以 32 位二进制字符串来表达光学系统中的所有结构变量（数目为 N ）：根据系统的光学特性，设定每个结构变量的取值范围，并将其转化为二进制字符串；则可将所有可变量编码为一个 $32 \times N$ 二进制字符串，如图 1-3 所示，对应一个光学系统结构，称为一条染色体，作为种群中个体，若干(n)条染色体组成一代，第一代则是根据给定的光学特性随机生成的一系列光学系统初始结构。

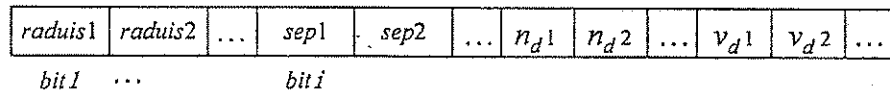


图 1-3 对应一个光学系统结构的字符串编码

第一代形成后，通过光线追迹计算并比较其评价函数，数值最低的个体被赋予高“适度函数值”，允许进入后代繁衍。繁衍过程中的杂交方式为两个父代的染色体按照随机方法交换部分基因片段，结合两者的特性产生新后代。如(1-18)式为单点杂交，将两个染色体杂交点的前后两部分进行交换，形成一对后代；(1-19)式中在两个随机位置分成三个字符串片段，交换片段，构成两点杂交。

$$\left\{ \begin{bmatrix} x_{i,1}, \dots, x_{i,k}, x_{i,k+1}, \dots, x_{i,l} \end{bmatrix}^T \right. \\ \left. \begin{bmatrix} x_{j,1}, \dots, x_{j,k}, x_{j,k+1}, \dots, x_{j,l} \end{bmatrix}^T \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{bmatrix} \underbrace{x_{i,1}, \dots, x_{i,k}}_k, \underbrace{x_{j,k+1}, \dots, x_{j,l}}_{l-k} \end{bmatrix}^T \right. \\ \left. \begin{bmatrix} \underbrace{x_{j,1}, \dots, x_{j,k}}_k, \underbrace{x_{i,k+1}, \dots, x_{i,l}}_{l-k} \end{bmatrix}^T \right\} \quad (1-18)$$

$$i, j \in [1, 2, \dots, n]; i \neq j, k < l$$

$$\left\{ \begin{bmatrix} x_{i,1}, \dots, x_{i,k1}, x_{i,k1+1}, \dots, x_{i,k2}, x_{i,k2+1}, \dots, x_{i,l} \end{bmatrix}^T \right. \\ \left. \begin{bmatrix} x_{j,1}, \dots, x_{j,k1}, x_{j,k1+1}, \dots, x_{j,k2}, x_{j,k2+1}, \dots, x_{j,l} \end{bmatrix}^T \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{bmatrix} \underbrace{x_{i,1}, \dots, x_{i,k1}}_{k1}, \underbrace{x_{j,k1+1}, \dots, x_{j,k2}}_{k2-k1}, \underbrace{x_{i,k2+1}, \dots, x_{i,l}}_{l-k2} \end{bmatrix}^T \right. \\ \left. \begin{bmatrix} \underbrace{x_{j,1}, \dots, x_{j,k1}}_{k1}, \underbrace{x_{i,k1+1}, \dots, x_{i,k2}}_{k2-k1}, \underbrace{x_{j,k2+1}, \dots, x_{j,l}}_{l-k2} \end{bmatrix}^T \right\} \quad (1-19)$$

$$i, j \in [1, 2, \dots, n]; i \neq j, k1, k2 < l; k1 < k2$$

在对染色体实施突变操作时,为使随机变化的影响不致过大,在二进制字符串中位的突变(反转)概率按其对数值的影响来定义,高位突变概率低,低位则高。解码时在初始光学结构基础上,依据字符串的取值为对应的结构参量赋值,生成新的光学系统。重新计算后代中每一个染色体的评价函数值,淘汰其中最坏的设计,将好的设计保留,为确保种群中个体数量不变,引入一组随机生成的染色体;将保留下来的染色体与新引入的染色体作为新一代进入繁衍。按上述方式不断进行繁衍,直到满足遗传算法的结束条件。

上述基因算法中的初始结构随机生成,无须人工干预;没有导数计算,优化时间不会随变量总数增加而快速增长。但此种算法无任何经验数据辅助,所生成的初始系统和繁衍的后代经常具有很大的评价函数值,像质很差,甚至根本无法进行光线追迹;而且连续变量的离散化也会引入不良结果。Ono^[64]等试图以实数编码表示结构变量,并提出在进行优化前,对第一代光学系统中的光学面曲率半径和面间间隔按从物方到像方的顺序进行尝试修改的操作,以确保光线追迹和满足光学系统焦距要求。这种方式虽可在一定程度上提高遗传算法的繁衍效率,但结构参量修改的随机性同样会导致优化的盲目性。

1.3.3 全局搜索法

Sturlesi 和 O'Shea^{[65][66]}把全局搜索算法应用在两片镜光学系统的设计,得到了一些好的结果。该算法将每一个结构变量如曲率半径和间隔按其整个取值范围分为 N 段,对不同的值进行组合构成新的系统并计算其评价函数。当 N 足够大时,就可能通过这种全局抽样找到好的设计结果。

但随着结构变量数目的增加,全局搜索法所需的计算时间呈指数级上升,故此完全不适用于优化复杂光学系统。例如,对一个具有 12 个变量的系统,如果把每个变量的取值范围分成 100 段,则所有变量的不同取值能够产生的系统总数为 100 的 12 次幂,即 10^{24} 个。若采用基于波像差的评价函数,假设每秒可计算 10 万个,则需要 3 万亿年来评价所有的系统。

1.4 现有光学设计软件

最早的光学设计软件开发于上世纪五十到六十年代,商品化软件则出现于七十年代^{[11],[67]-[72]}。目前国际上的著名光学CAD软件有Optical Research Associates的CODE

V^[73], Focus Software公司的ZEMAX^[74], Lambda Research Corporation的OSLO; 国内有北京理工大学的SOD88和GOLD软件^[75]等。除SOD88中采用了适应法优化算法外, 这些软件所采用的优化内核技术都基于阻尼最小二乘法, 在初始结构选择合理的前提下, 通过局部优化就可以得到符合设计要求的光学系统。

随着计算机计算速度的提高, 近年来国际上一些软件已推出全局优化功能。其中, CODE V 提供的“Global Synthesis”在该软件功能强大的阻尼最小二乘法优化的基础上加入了某种定向搜索机制, 可以处理变量在 50 个以上的复杂系统, 高速高效地自动找到许多不同的设计结果, 但该公司出于商业利益原因没有公开其算法原理; 同时, CODE V 软件的售价十分昂贵, 非国内一般用户所能支付。ZEMAX 提供了两种全局优化方法, 第一种称为“Global Search”, 综合采用了遗传算法、传统的阻尼最小二乘法和某种搜索“新型”的专家系统; 第二种为“Hammer”优化算法, 在阻尼最小二乘法找到一个局部极小时, 用大幅调低阻尼因子的手段有意增大正规方程组的解向量长度, 迫使优化进程跳出此局部继续寻找其它结构。这两种算法带有方式不同的随机性或随意性, 造成优化效率低, 实用性较差。

这些全局优化软件还有着共同的局限性。如设计者给出了四片镜的初始结构, 软件只会寻找四片镜的各种可能结构, 不会根据需要考虑五片或三片镜的结构; 设计者选择了胶合型, 软件也不会将其变成分离型等等。而真正意义上的智能化全局优化算法, 应能实现根据优化进程的需要自动增加或减少光学元件, 有目的地脱离初始结构形式限制, 但目前国内外这方面的研究仍属于空白。

此外, 阻尼最小二乘优化算法中要求变量连续, 而光学系统中的玻璃材料参量为离散值。为实现这类结构参量的优化, 一般需将其转换为折射率和色散系数等连续变量; 为使变量的取值与实际玻璃接近, 在优化过程中要用适当的边界条件将其变化控制在一定范围内。但这种方法无法保证优化结束时折射率和色散系数的取值与某个实际玻璃重合, 只能用最近的玻璃来代替。此过程往往会反过来影响系统的像质, 在优化变量值与玻璃参数差别较大时, 常常要对系统重新设计。现有的软件提供的解决方案是给出玻璃替代的程序, 在优化达到设计要求时, 由设计者指定玻璃库, 把材料变量转换成实际玻璃, 再重新对其它的连续变量做进一步的优化, 使设计过程十分繁复。

1.5 变焦距系统设计

变焦距系统是一类设计难度很大光学系统。除了由于变焦系统内部含有运动部件

需要更加复杂的边界条件控制、结构优化时需要同时兼顾各个焦距的成像质量等因素外,造成其设计困难的另一个重要原因是这类系统更新迅速,如单反照相机变焦距物镜的变倍比已从几年前的3倍发展到现在的7倍以上。故此当设计人员接到新的设计任务时,难以从已发表的文献中找到类似的参考结构,需要从高斯光学的分析出发建立初始结构。而目前无论是国内研制的光学设计软件还是国外的产品软件都没有提供建立变焦镜头初始结构的功能,全靠设计者的经验。

近年来,变焦距系统得到了越来越广泛的应用^[76]。在民品方面,日本各光学公司之所以长期独霸照相机、摄像机、望远镜等产品的国际高档市场,与它们能够不断地为这类产品设计配备像质更好、变倍比更大、体积更小、重量更轻的变焦距系统有很大的关系。事实上这些公司都在自行研制并不断完善变焦距系统的专用设计软件,但为维护自身的商业利益不对外公开。在军事领域,各先进国家的热像系统、观瞄系统也在迅速地从传统的定焦系统向使用更方便的变焦距系统发展,积极筹划于把变焦距系统作为智能化现代军队的必要装备。由于变焦距系统的快速发展和广泛应用,近年来国际工程光学学会(SPIE)多次为其召开了专题学术研讨会^{[77][78][79]}。

国内有关单位如西安光机所、长春光机所、北京理工大学、浙江大学等对变焦距系统分别进行过探讨^{[80]~[83]},有过一些成功的设计实例,但未对设计方法做系统的研究,没有成熟的专用软件。目前我国变焦距系统设计的整体水平大大落后于日本、美国等先进国家。仅以单反式相机变焦距物镜为例:当日本的28-200mm、24-120mm大变倍比镜头已经充斥市场的时候,国内光学企业设计制作的28-80mm镜头尚不过关,故此国产光学民品只能在低端市场残酷竞争。

1.6 本论文的研究动机和目标

随着科学技术的不断发展,光学工业和国防建设不断提出对更高性能和质量的光学系统的需求,相应的设计工作日益增多。然而,国内一些单位却面临有经验的光学设计人才严重青黄不接的局面。此问题不是我国独有,日本尼康公司一高级管理人员分析说,光学设计的经验需要长期积累,这项工作本身又比较枯燥繁琐,在快节奏的现代社会中,年轻人不愿对此十分投入,以至该公司的光学系统设计依赖于几个五、六十岁的“光学神仙”。我国受文化大革命的影响,许多单位这种光学设计后继无人的现象更加突出。

本文的研究工作旨在提高光学CAD软件的智能化程度和光学设计的自动化程

度, 逐渐减少设计工作对设计者经验的依赖, 以便缓解上述矛盾。这项工作具有重要的理论意义和明确的应用前景, 得到了国内许多有关单位的欢迎和支持, 得到了国家自然科学基金的连续资助, 包括:

项目号 69778019, 《复杂光学系统全局优化技术的研究》

项目号 69978001, 《变焦镜头的智能化设计方法研究》

项目号 60025513, 《技术光学》(国家杰出青年科学基金项目)

论文重点探讨实现智能化光学设计所急需解决的一些关键问题, 包括全局优化算法的改进和完善、自动增减光学元件机制的提出、玻璃类离散变量优化方法的研究和变焦镜头初始结构专家系统的建立等等。

1.7 本论文的主要内容

论文各章的内容安排如下:

第一章 阐述了光学设计和优化的基本概念, 对目前应用的阻尼最小二乘法、适应法、模拟退火、遗传算法和全局搜索等局部和全局优化算法进行了综述, 介绍了国内外现有的光学 CAD 软件及它们提供的优化功能, 分析了变焦系统设计的现状, 最后介绍了论文的研究动机和主要内容。

第二章 对逃逸函数全局优化算法进行了深入研究。这种全局优化的运行是由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成的。提出了两个搜索机制分别寻找最佳阻尼因子和最优解向量长度; 用实验方法确定了逃逸函数的控制参数的最佳缺省值, 有效地提高了逃逸函数算法的优化效率。在此基础上成功研制出国内第一个实用化的复杂光学系统全局优化程序。

第三章 讨论了用遗传算法在光学系统的优化过程中增减光学元件的方法和存在的问题。提出了国际上第一个不含随机性算法的自动增减光学元件的机制, 其中采用了镜头形态参数 W 和 S 做为评价指标, 通过大量试验证明了该机制的可行性。

第四章 分析了用传统方法和遗传算法实现玻璃类离散变量优化所存在的问题。探索了神经网络算法对此类离散变量优化的应用, 建立了基于神经网络的玻璃类离散变量优化模型, 给出了设计实例的优化结果。

第五章 分析了变焦距光学系统设计的发展现状。提出了对任意变焦方式的变焦镜头的高斯光学参数的自动计算方法。对近两千个变焦距光学系统专利进行了逐个分

析，并在此基础上建立了组元数据库。提出并研制了用来自动生成变焦距光学系统的初始结构的专家系统，通过变焦系统的设计实例验证了该专家系统的实用性。

第六章 总结了本论文的研究工作的成果和创新之处，指出了进一步研究的方向。

第二章 基于逃逸函数的复杂光学系统全局优化算法

逃逸函数法是迄今为止公开发表的最为实用的光学系统全局优化算法之一。这种全局优化的运行由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成。本章探讨提高其优化效率、使其达到实用化的方法。提出了两个搜索机制以便提高各个局部优化的效率。首先搜索最佳阻尼因子以确定结构变量的多维空间中解向量的最优方向；再沿该方向搜索解向量的最佳长度。对逃逸函数控制参数在全局优化中的作用进行了分析，在对大量光学系统的实验基础上，确定了其最佳缺省值。

2.1 逃逸函数算法

日本东京工艺大学一色真幸教授提出的逃逸函数算法^[84]，是解决困扰阻尼最小二乘法优化的局部极小值问题的一种切实可行的方法。其基本思想是：在优化过程中找到了局部极小值后，首先记录此处的评价函数及相应的结构变量（如图 2-1，记为 x_{jA} ）的值，然后在评价函数中加入逃逸函数，定义如下：

$$H \left\{ \exp \left[-\frac{1}{2W^2} \sum_j [\mu_j (x_j - x_{jA})]^2 \right] \right\}^2 \quad (2-1)$$

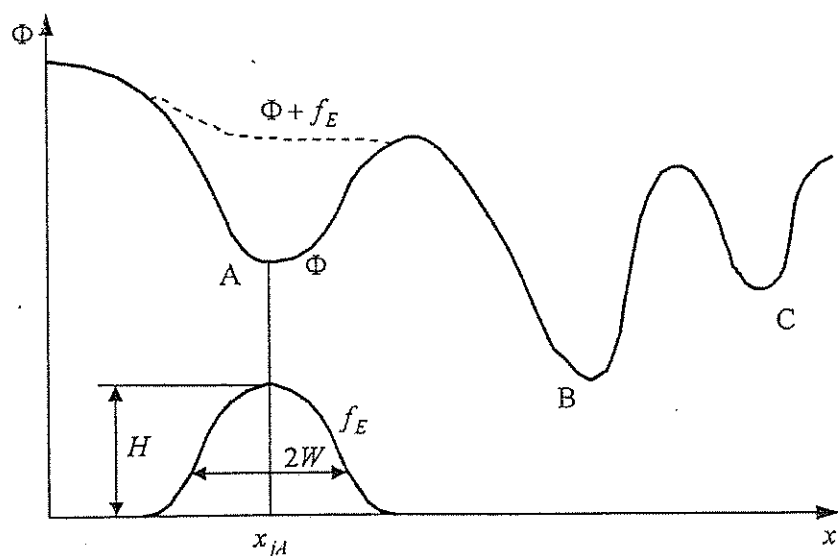


图 2-1 一维变量空间中逃逸函数工作原理示意图

此逃逸函数起到了在局部极小点附近填充凹陷的作用，从而改变了原评价函数在

结构变量空间中的“地形”。其中 μ_j 是由第 j 个变量的类型确定的权因子，参数 H 与 W 控制逃逸函数的高度及其覆盖范围。

用阻尼最小二乘法对加有逃逸函数的新的评价函数进行优化，设计结构将被迫离开被逃逸函数抬高的区域，从而远离已经找到的局部极小。这一步实现后，则从评价函数中去掉逃逸函数，重新开始正常的优化，以寻找其它更好的设计结构。

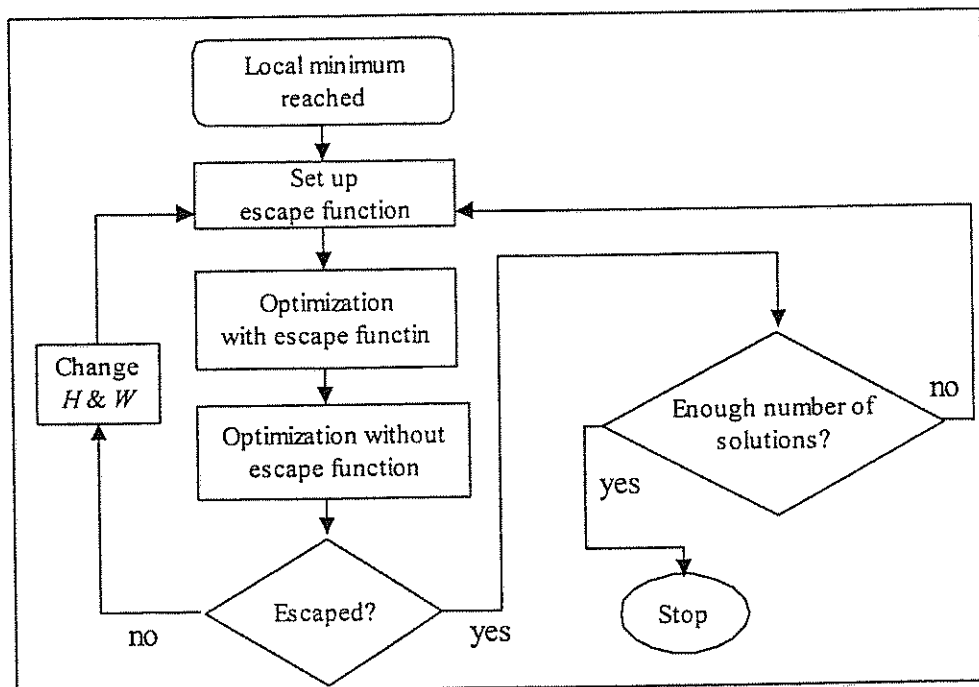


图 2-2 逃逸函数算法流程图

与本文第一章中介绍的其它的全局优化算法如模拟退火^[50]和全局搜索^[64]相比，逃逸函数算法有两大优点。首先它没有随机抽样操作，所需的优化时间不会随着变量数目的增多而呈指数性增长；其次，使用者定义的各个边界条件限制在优化的整个阶段都在起作用，可以有效防止优化进程进入结构变量空间的许多无意义的区域（例如元件的中心和边缘厚度为负，或系统焦距值与设计值偏离过大），从而实现在结构变量空间的定向搜索。因此，逃逸函数算法在理论上是一种效率很高的全局优化算法，而效率是评价全局优化算法优劣的最重要的指标。

显然，基于逃逸函数的全局优化算法是由多个不加或加入逃逸函数的局部优化组成的，故此改进阻尼最小二乘法优化算法是进一步提高其效率的一种十分有效的方法。此外，为逃逸函数的两个控制参数 H 和 W 对全局优化的进程也有很大影响。从图 2-1 中可以看出，如果 H 和 W 的值取得太小，逃逸函数的高度和宽度就不足以填充评价

函数在A处的凹陷,会导致逃逸失败,去掉逃逸函数后优化进程又会自动回到A点;如果 H 和 W 的值取得太大,附加的逃逸函数就有可能在填充A处凹陷的同时覆盖B点,从而失去找到在局部极小值附近的全局最优解的机会。由于在结构变量的多维空间中评价函数的各个局部极小值附近的地形地貌各不相同,选择合适的逃逸函数控制参数数值一般需要数次尝试。通过实验找出控制参数对逃逸机制的影响规律,确定合理的缺省值,是提高优化效率的另一个重要途径。

2.2 阻尼最小二乘法优化效率的提高

目前国际上的主流光学设计和工程软件均采用阻尼最小二乘法作为其基本优化算法,而使用的评价函数的一般形式为

$$\Phi = \sum_i \omega_i^2 f_i^2 \quad (2-2)$$

式中 f_i 为实际像差, ω_i 为权重。 f_i 是光学系统结构变量 x_j ($j=1,2,\dots,n$)的函数,这些变量可以是光学面的曲率、相邻两面的轴向间距、介质的折射率与色散系数等等。优化的目的是找到评价函数 Φ 在多维结构变量空间的最小值,而阻尼最小二乘法则试图找到一组 x_j 以满足以下条件:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (2-3)$$

f_i 的函数形式通常十分复杂且高度非线性,为求解(2-3)式,把每个 f_i 在起点 x_{j0} 处近似为变量 x_j 的线性函数。这样解出的结果自然也是近似值,但通过多次迭代可望逐渐会聚于准确值。为保证会聚,解向量需在适当的长度内,以不超出线性近似范围。为此,在评价函数中加入阻尼量,其一般形式为

$$D \sum_j \sigma_j (x_j - x_{j0})^2 \quad (2-4)$$

在这里 σ_j 是由第 j 个变量的类型决定的局部阻尼因子, D 则为整体阻尼因子。

阻尼最小二乘法优化中需要使用像差随结构变量变化的一阶导数,这些导数的值是用有限差法计算得到的。实验表明,导数计算占据了很大一部分优化计算时间,随着结构变量总数的增加,所占的比例可能超过90%。因此,为了提高阻尼最小二乘算

法的效率，应该设法在每次迭代中充分利用导数计算结果，使系统得到最大程度的改善。为此我们提出寻找最佳整体阻尼因子和最佳解向量长度。

控制整体阻尼因子的传统方法是：在每次迭代中建立海赛矩阵后，把阻尼因子加入在对角线上的各项；然后解该正规方程组，求得结构变量的一组变化量 Δx_j ，将其加入结构变量得到新的系统，并以光线追迹来评价。系统的实际改善由 $\Phi_0 - \Phi_1$ 给出，其中 Φ_0 和 Φ_1 分别代表迭代前后的评价函数值；而在线性近似下对系统改善的估计值为：

$$\Phi_0 - \Phi_{\text{LIN}} = \Phi_0 - \sum_i \omega_i^2 \left(f_{i0} + \sum_j \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j \right)^2 \quad (2-5)$$

整体阻尼因子的取值则根据两者的比值按表 2-1 的规律进行调整。

表 2-1 对整体阻尼因子 D 的调整

$R = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{\Phi_0 - \Phi_{\text{LIN}}}$	Adjustment to D	Action
$R \leq 0$	$D_1 = 5 \cdot D_0$	After a failed iteration, changes to the variables are reversed, and the original normal equations are re-solved with the new damping factors added down the diagonal terms.
$0 < R \leq 0.5$	$D_1 = 2 \cdot D_0$	Start a new iteration using the new global damping factor.
$0.5 < R \leq 0.75$	$D_1 = D_0$	
$0.75 < R \leq 1.25$	$D_1 = 0.5 \cdot D_0$	
$R > 1.25$	$D_1 = D_0$	

为在每次迭代中使评价函数得到最大幅度的降低，必须更加仔细地选择整体阻尼因子。Jamieson^[85]曾经提出曲线拟合法，但在一些特殊情况下，曲线拟合计算出的阻尼因子有可能导致失败的迭代。为避免不必要的繁琐，本文提出直接搜索机制。在优化的第一次迭代中，搜索从固定起始点 $D=1$ 开始。如果用此整体阻尼因子解出的系统不如初始结构 ($\Phi_1 \geq \Phi_0$)，就把 D 值乘以 10.0 重新求解正规方程组。这样不断反复直至找到某个 D 值使 $\Phi_1 \leq \Phi_0$ 。此后，再用因子 2.0 继续调整（减小或增大） D 值并重复解方程组、分析求得的过程，直到找出对应 Φ_1 最小时的 D 的最佳值。用此最佳值作为当前迭代的最终整体阻尼因子，以及下一轮迭代中对 D 搜索的起始值。

整体阻尼因子值的变化将导致正规方程组的解向量的大小及方向同时发生变化。图 2-3 中绘出了仅有 2 个变量的简单情况下的示意图, 其中用等高线表示评价函数值在结构变量空间的分布情况。A 点为初始结构的位置, 而在 B 点有一个局部极小值。当整体阻尼因子的值取得很大时, 求得的解向量的方向为沿等高线在 A 点的法线的下降方向 (steepest descent), 但其长度很小, 导致极低的优化效率, 如图中 D_1 点所示; 相反, 过小的整体

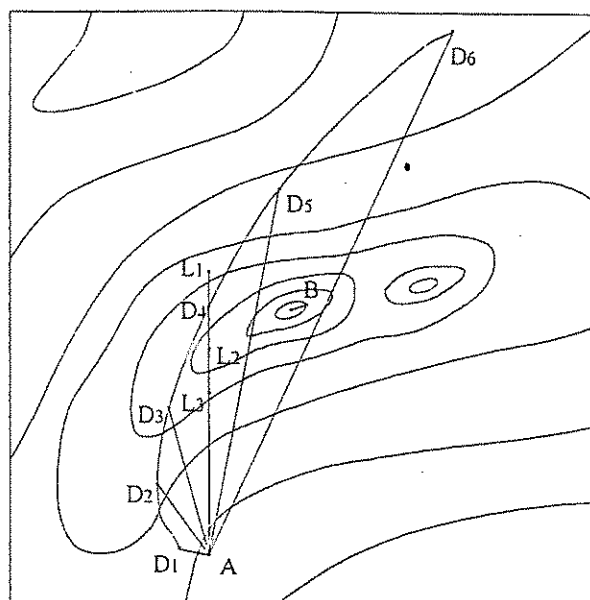


图 2-3 整体阻尼因子和解向量长度搜索

阻尼因子会使解向量的长度过大而超出线性近似的有效范围, 从而将优化进程导向变量空间中更差的区域, 如 D_6 点所示。除第一次迭代外, 对整体阻尼因子的搜索总是从上一迭代中使用的 D 值开始, 故此用于本次迭代的最佳值一般只需几次尝试就可以很快找到。

用上述搜索方法选择的整体阻尼因子确定了解向量在结构变量空间的“最佳”方向。为求系统在每一迭代中获得更大的改善以进一步提高优化效率, 本文提出加入第二个搜索机制, 沿已确定的方向找寻解向量的最佳长度。图 2-3 中, $\overline{AD_4}$ 为对应搜索找到的最佳整体阻尼因子的解向量。在这个方向上, 以因子 1.3 对解向量的长度进行调整。最佳长度 (图中以 L_2 表示) 一般只要几次实验就可以得到。

将上述两个搜索机制编程实现后, 对不同的光学系统进行了测试验证。一个比较典型的结果如图 2-4 所示, 被优化的系统是一个 5 片的广角镜头 (日本专利号 28,029,680)^[86]。当系统中所有光学面的曲率、轴向间距和玻璃材料参数都作为优化变量时, 变量总数为 30 个。三条曲线给出了在不同的阻尼最小二乘法优化进程中, 评价函数值从初始结构 A 点出发随计算用时的变化情况。在用短划线绘制的优化进程中, 整体阻尼因子由表 2-1 给出的常规方法控制, 其中几段上升的曲线是由失败的迭代造成的。长划线给出的进程中采用了对整体阻尼因子的搜索机制, 因此消除了失败迭代, 而且在优化的各个阶段都起到了大大节省计算用时的目的。在评价函数达到一个稳定低点, 局部优化结束时, 节时约 14.3%。进一步加入第二个搜索最佳解向量长

度的机制, 可把此节时率提高到 28.6%, 如图中实线所示。在一般情况下, 节时率是随着结构变量总数的增加而提高的。图 2-5 画出了 6 片反摄远物镜 (美国专利号 4,099,850) ^[87] 的优化进程; 7 片反摄远照相物镜 (美国专利号 3,583,791) ^[88] 的优化进程见图 2-6; 8 片微型广角镜头 (日本专利号 57,197,598) ^[89] 的优化进程如图 2-7 所示; 对这三个系统优化时选用的变量总数分别为 36、42 和 46。表 2-2 列出了采用常规整体阻尼因子控制方法、仅采用对整体阻尼因子搜索机制、同时采用两种搜索机制时, 评价函数达到稳定水平所需的优化时间。这组图表及数据不仅进一步确认了本文提出的搜索机制的节时功能, 而且体现出在邻域有多个局部极小点的情况下, 搜索机制有直接将优化进程导向其中更佳解的能力。

本文提出的搜索机制在应用于有许多变量的复杂系统的优化时效果最明显。但如图 2-8 所示, 在对简单系统 (仅有 5 个变量的单色光 2 片镜, 该系统在参考文献[50]和[64]中被用来测试不同的全局优化算法) 的优化中, 采用了对整体阻尼因子及解向量长度的搜索机制的优化进程仍要好于无搜索进程。

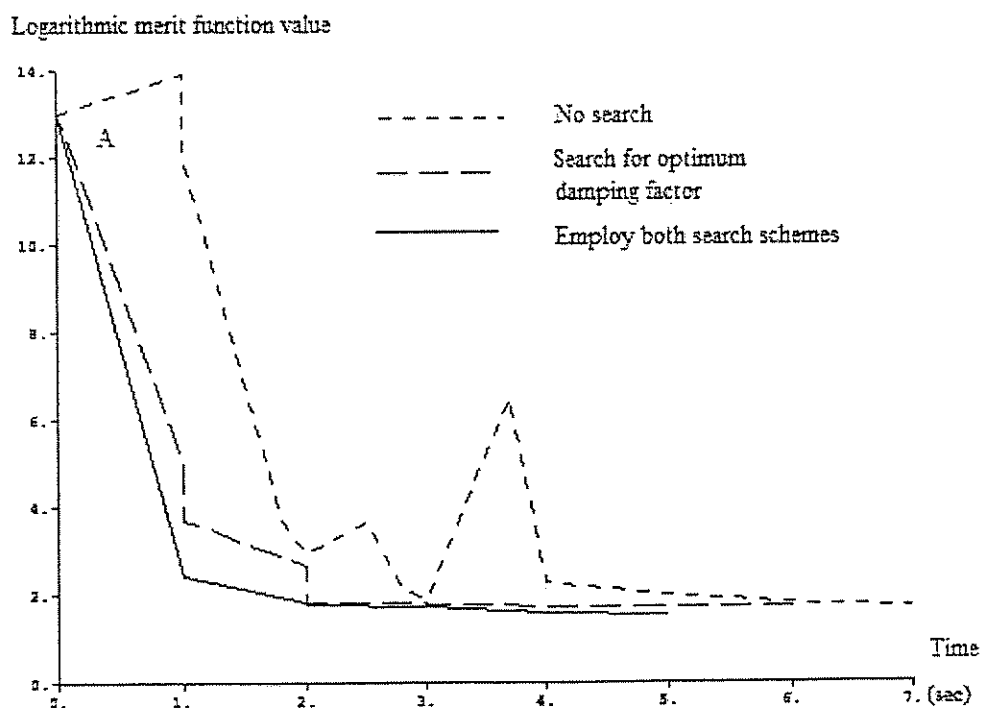


图2-4 5片系统的优化进程

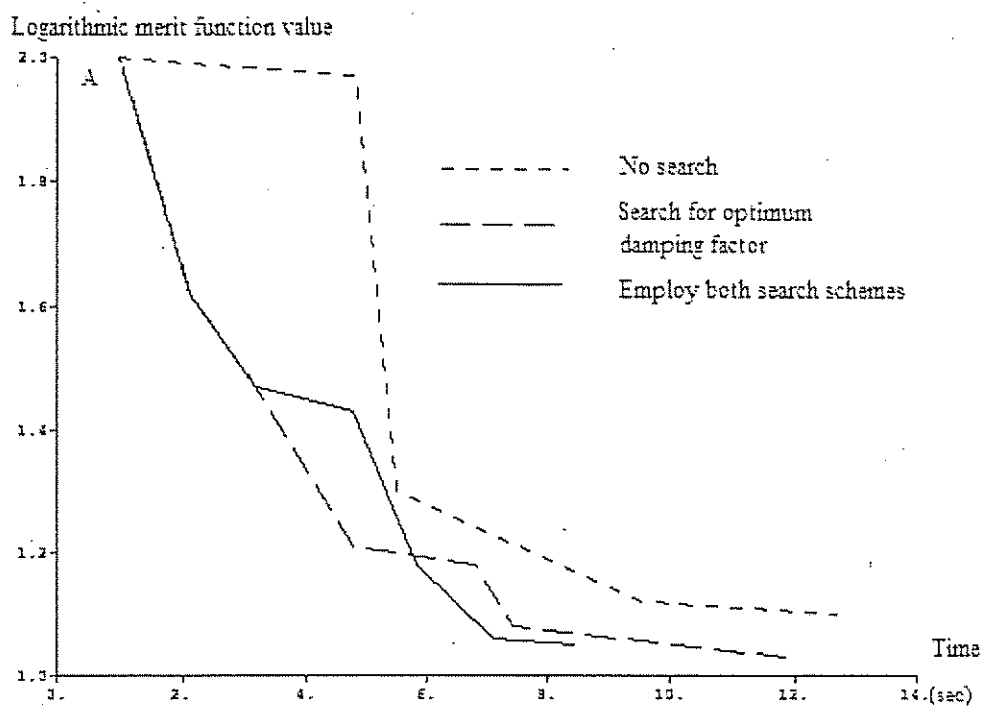


图2-5 6片系统的优化进程

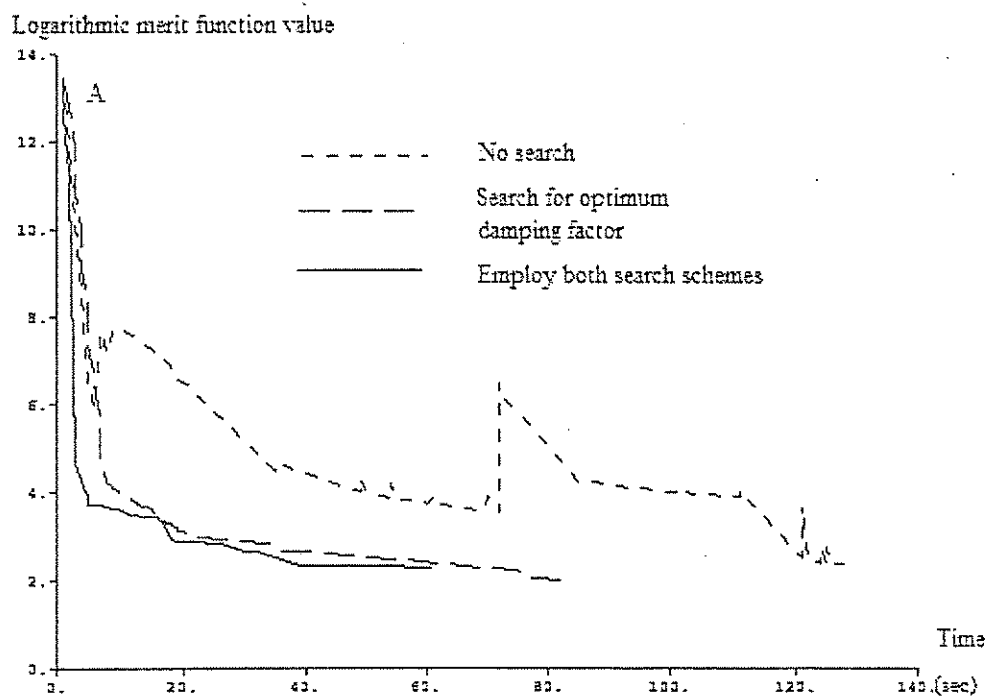


图2-6 7片系统的优化进程

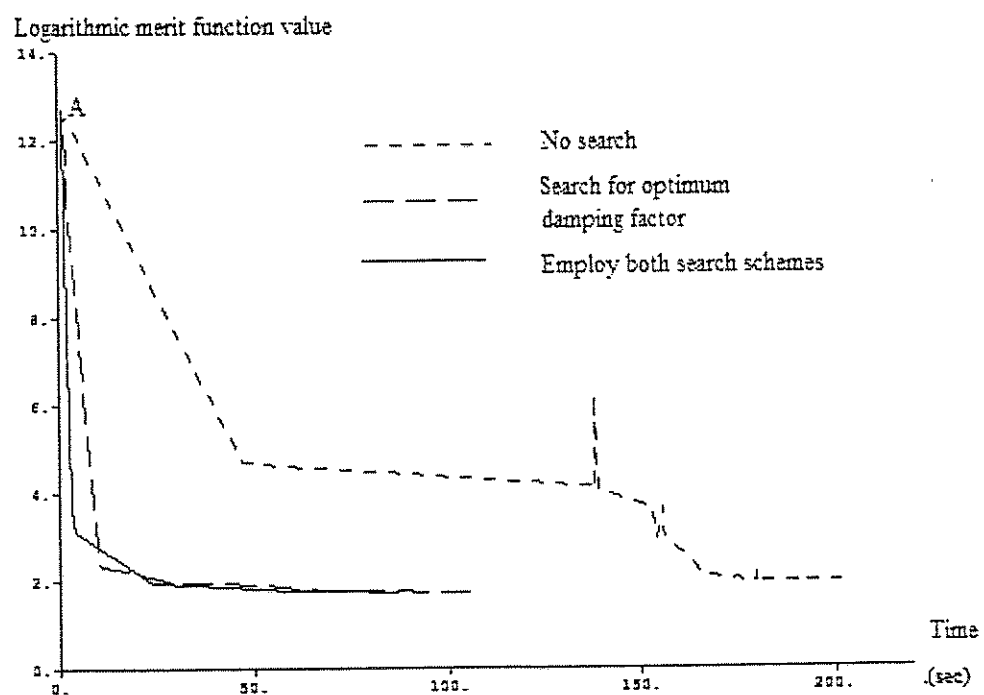


图2-7 8片系统的优化进程

表 2-2 5 片系统、6 片系统、7 片系统和 8 片系统采用两种搜索机制的节时率

	No search	Search for optimum damping factor	Employ both search schemes	Time saving rate for first search scheme	Time saving rate for both search schemes
5-element system (30 variables)	7	6	5	14.3%	28.6%
6-element system (36 variables)	13	11	8	15.4%	38.5%
7-element system (42 variables)	128	82	61	35.9%	52.3%
8-element system (46 variables)	202	105	87	48.0%	56.9%

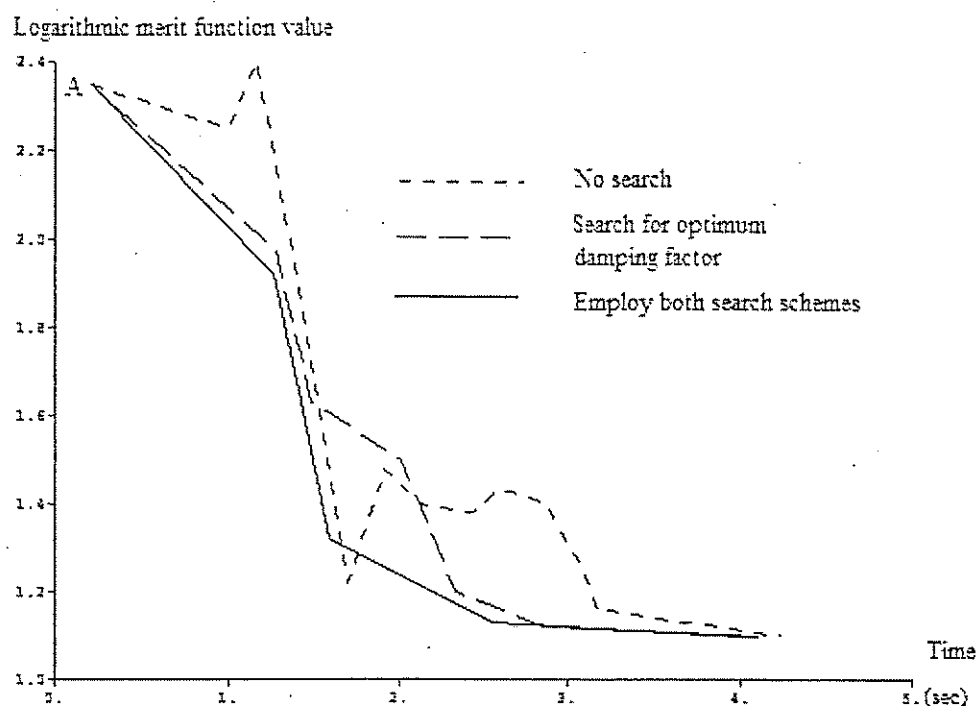


图2-8 5个变量的单色光2片镜的优化进程

在逃逸函数全局优化算法中,整体阻尼因子的控制还需要注意以下问题。在阻尼最小二乘法优化过程中,整体阻尼因子的值一般为逐渐增大,在找到某个局部极小点时通常会变得很大。在全局优化中,为了使进程摆脱局部极值,程序把逃逸函数加在评价函数上,使邻近区域的地形产生了巨大的变化。因此,在对加有逃逸函数的新的评价函数重新开始优化之前,最好把整体阻尼因子调整到一个较小的值(例如可以是固定起始值 $D=1$),免得搜索机制需要多次减小 D 后才能找到最优值。而另一方面,在完成逃逸后,设计结构应该已经远离逃逸函数的作用区域,故此从评价函数中去除逃逸函数不会对目前所在的局部地形有较大影响,这时在以原始评价函数重新开始优化前,无需再调整整体阻尼因子。

本文提出的最佳整体阻尼因子和最佳解向量长度的搜索机制充分地利用了导数计算结果,在每次迭代中使系统得到最大程度的改善,有效地提高了阻尼最小二乘法局部优化的效率。由于基于逃逸函数的全局优化是由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成的,搜索机制对其效率的改进就更加明显。

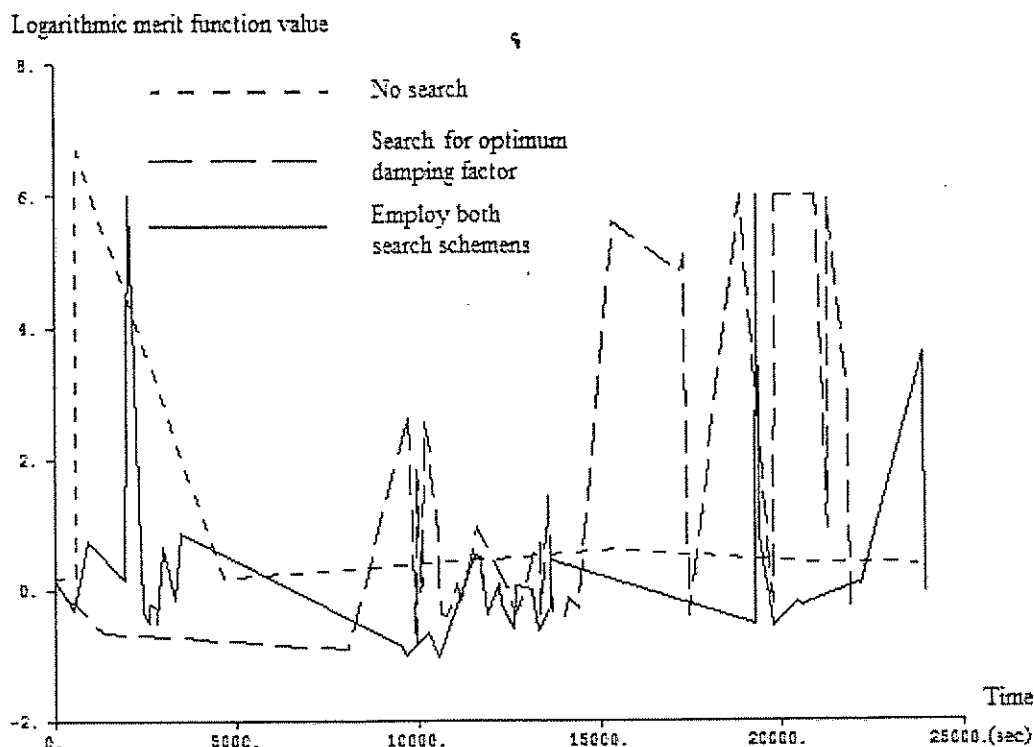


图2-9 不采用与采用搜索机制的9片电影放映物镜的全局优化进程

图 2-9 给出的对 9 片电影放映物镜^[90]的全局优化进程是一个典型的例子。在对该系统的优化中，为了使优化结果与原始专利的设计要求相符，加入了对系统焦距、最小后截距、最大总长、镜片中心与边缘厚度、玻璃变化区域、轴外视场畸变的控制。三条曲线分别绘出了在全局优化的各个阻尼最小二乘法局部优化中不采用任何搜索机制、仅采用对整体阻尼因子的搜索机制、同时采用两种搜索机制时，评价函数值从初始结构出发随计算用时的变化情况。在三种情况下，所能找到的第一个局部极小分别为 1.689, 1.240 和 1.045。在短划线绘制的全局优化进程中，整体阻尼因子由表 2-1 给出的常规方法控制，在给定时间内（400 分钟）只能找到 2 个局部极小；长划线给出的进程采用了对整体阻尼因子的搜索机制，在同样时间内可以找到 11 个局部极小；实线所示的进程加入了第二个搜索最佳解向量长度的机制，进一步提高了各个局部优化的效益、增强了快速导向局部最佳解的能力，因此找到了 13 个局部极小。

2.3 逃逸函数控制参数的选取

在完成一轮逃逸过程并找到一个新的局部极小点后，需要将其与以前找到的各组解比较，即计算它们在结构变量空间的加权均方根距离：

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [\mu_j (x_{jA} - x_{jB})]^2} \quad (2-6)$$

式中, μ_j 为由结构变量类型确定的权因子, x_{jA} 和 x_{jB} 表示当前解与另一组解的坐标。如果 d 小于预设阈值, 则认为两解相同, 没有逃逸成功, 就必须在此局部加一个更高更宽的逃逸函数重新进行逃逸尝试。由于结构变量空间的地形十分复杂, 需要数次尝试才能走出某个局部极小是常有的事。

在(2-1)式中, H 和 W 分别控制逃逸函数的高度和宽度。设 H_k 和 W_k 为第 k ($k=1, 2, \dots$) 次逃逸尝试使用的参数, 则它们由下式给出^[84]:

$$H_k = H_1 H_c^{k-1} \quad W_k = [1 + (k-1)W_c]W_1 \quad (2-7)$$

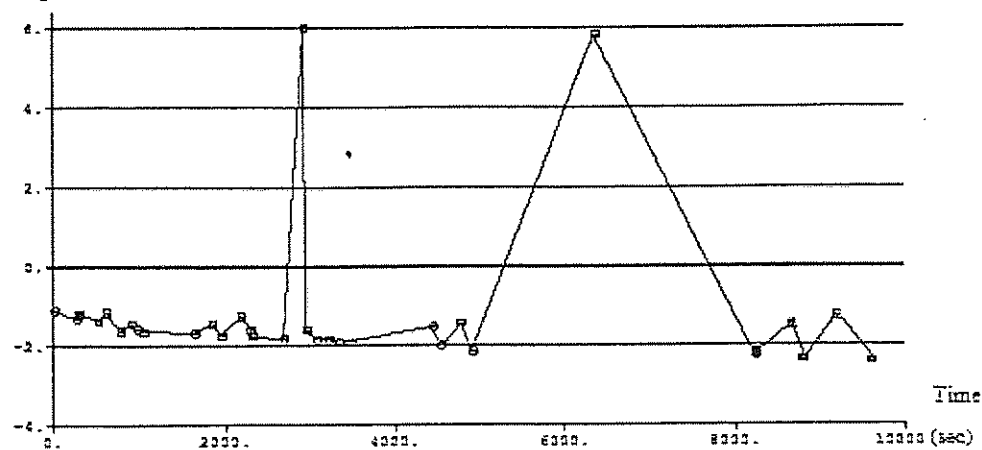
其中 H_1 和 W_1 为初始值, H_c 和 W_c 为增值因子。虽然优化软件一般允许用户修改这些控制参数, 但为了方便使用, 应提供一组对绝大多数光学系统均适用的缺省值, 为此本文做了大量实验。

全局优化功能的主要用途在于设计像质要求较高的光学系统, 因此我们的实验也集中针对这类系统。结果表明, 控制参数的初始值 (H_1, W_1) 应该相对较小, 使优化进程得以离开具有狭小地形特征的局部极小, 很快地找到距其不远的一个更佳解; 而增值因子 (H_c, W_c) 则应相对较大, 使进程在遇到又深又宽的盆地时, 能够在几次尝试后就逃逸成功。当用波像差的均方差作为优化的评价函数时 (在对像差较小的系统进行进一步的校正时, 这种评价函数的性能大大优于传统的垂轴像差平方和), 我们建议采用以下控制参数值:

$$\begin{aligned} H_1 &= 0.5 & W_1 &= 0.1 \\ H_c &= 2.0 & W_c &= 2.0 \end{aligned} \quad (2-8)$$

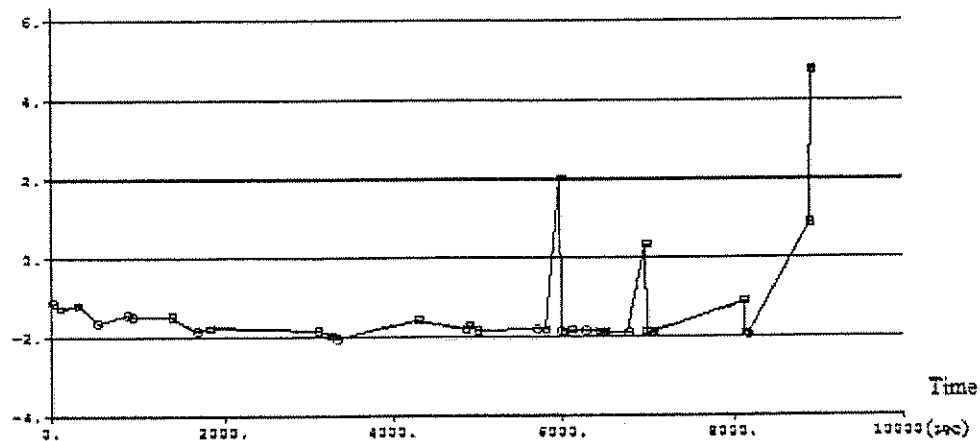
图 2-10 所示为一个典型的实验实例, 绘出了选用不同的逃逸函数控制参数的 9 个全局优化进程, 各图下分别给出了对应的控制参数。使用的测试系统是照相物镜 (美国专利号 2,780,139)^[91], 采用波像差的均方差作为优化的评价函数, 加入了对系统焦距、后截距、总长、轴外视场畸变、镜片中心与边缘厚度的边界条件控制。可以看到逃逸函数控制参数的选择对优化效率有明显的影响, 采用了上述推荐缺省值的图(a)在相同运行时间内对评价函数找到了最多最好的局部极小。

Logarithmic merit function value



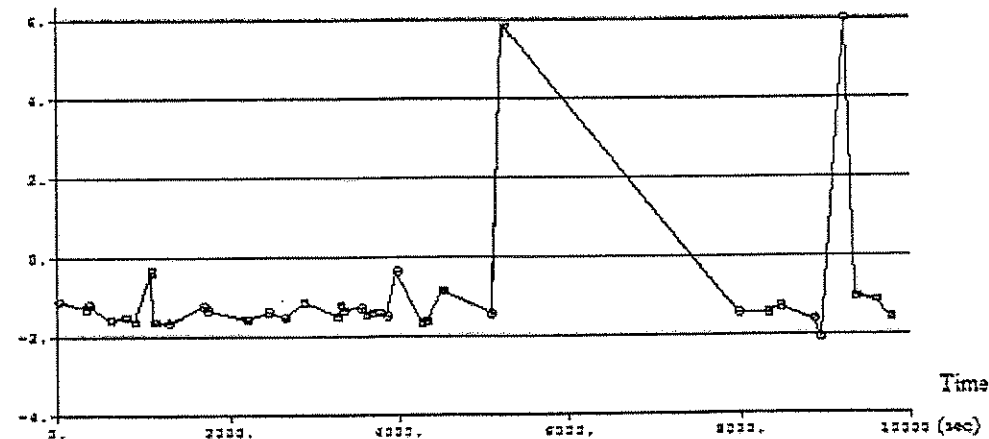
(a) $H_1 = 0.5, H_c = 2.0; W_1 = 0.1, W_c = 2$

Logarithmic merit function value



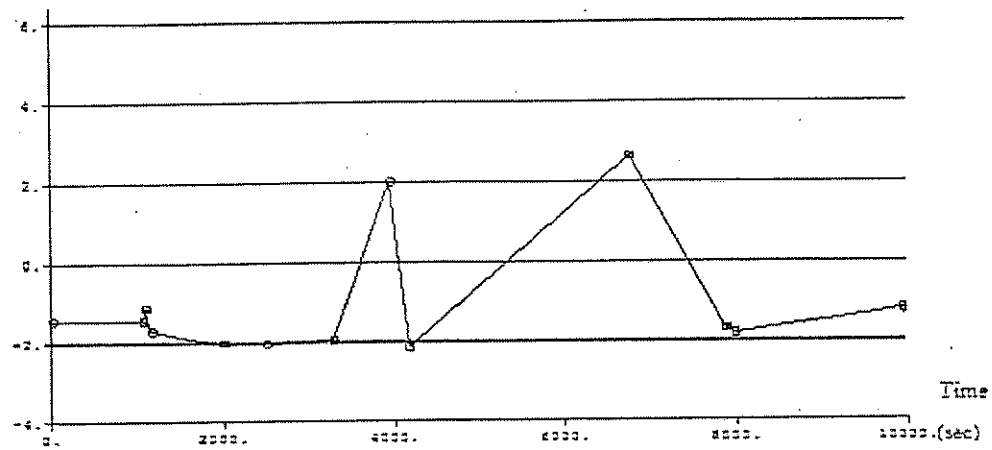
(b) $H_1 = 0.02, H_c = 2.0; W_1 = 0.1, W_c = 2$

Logarithmic merit function value



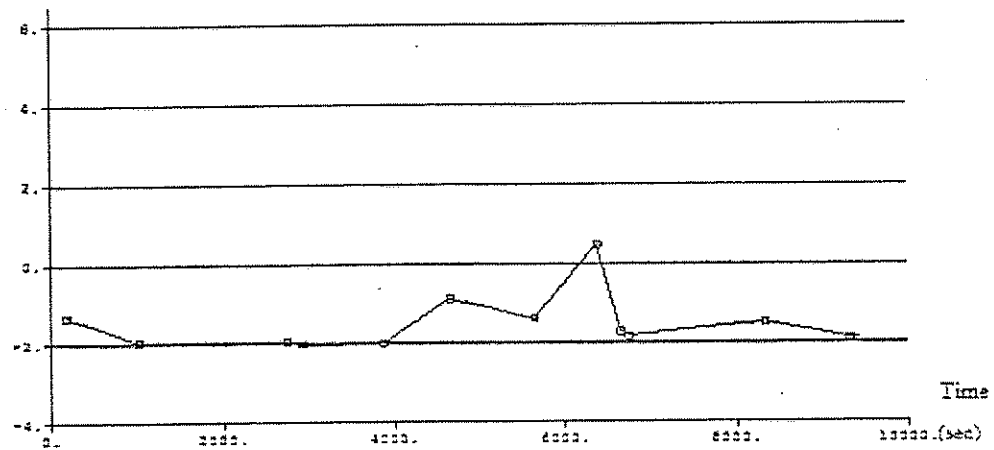
(c) $H_1 = 4.0, H_c = 2.0; W_1 = 0.1, W_c = 2$

Logarithmic merit function value



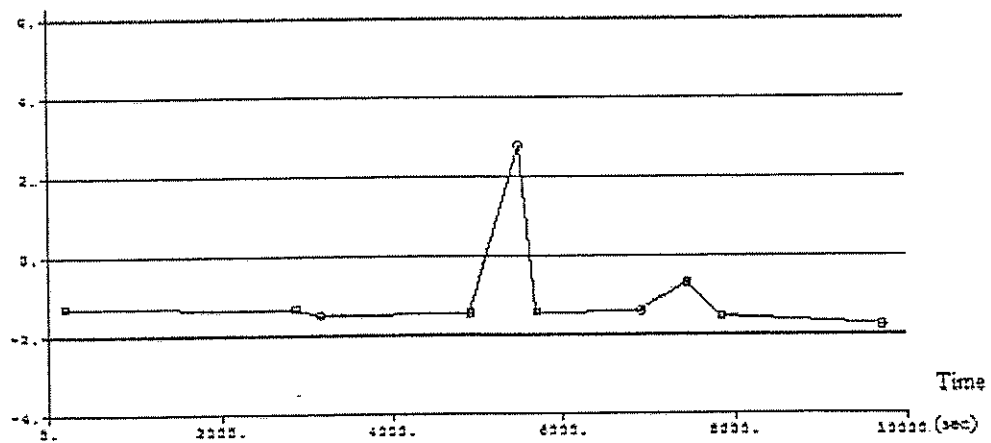
(d) $H_1 = 0.02, H_c = 2.0, W_1 = 0.02, W_c = 2$

Logarithmic merit function value

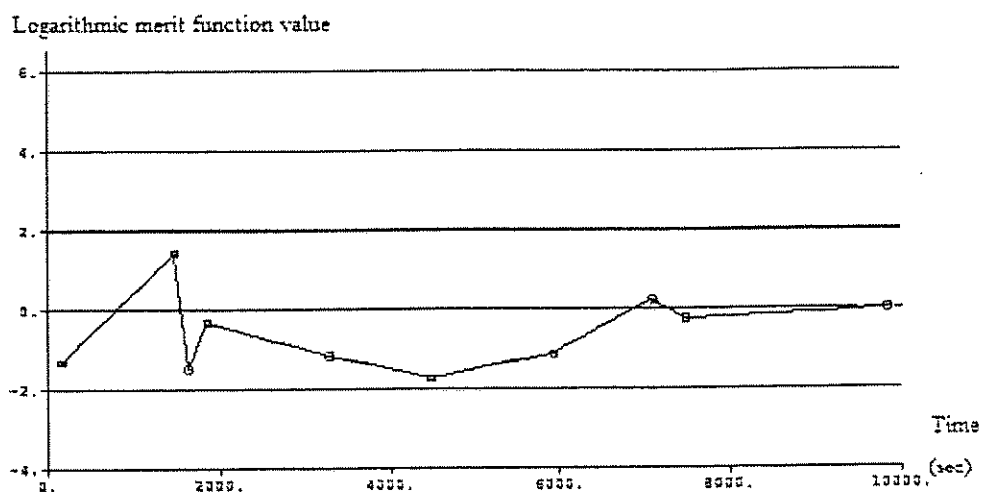


(e) $H_1 = 0.02, H_c = 2.0, W_1 = 5.0, W_c = 2$

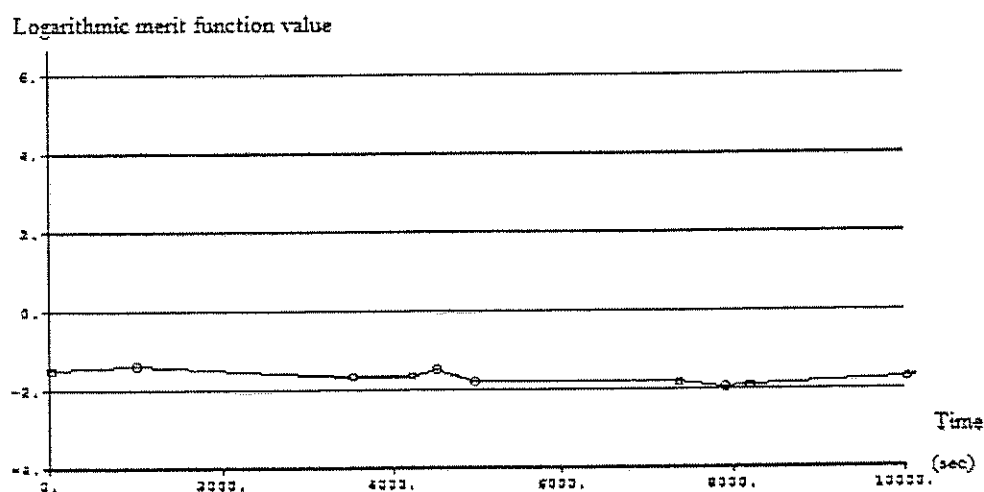
Logarithmic merit function value



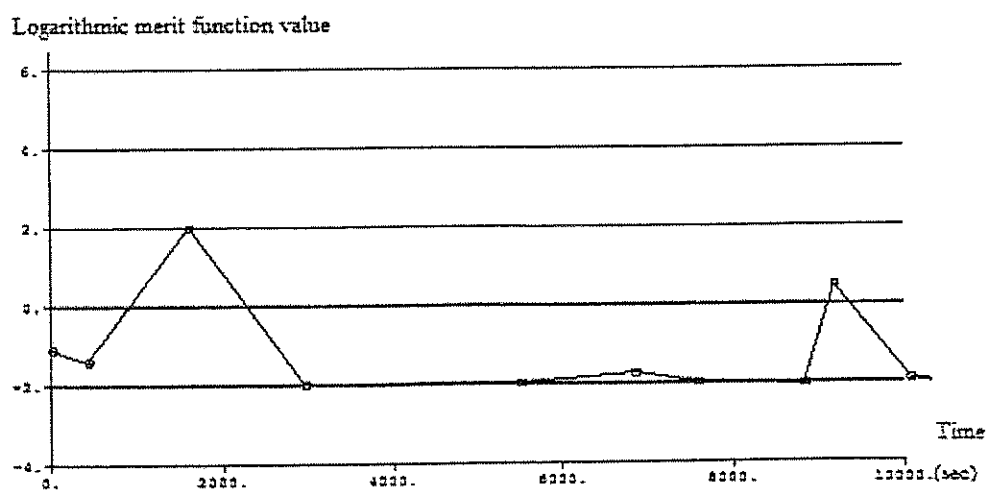
(f) $H_1 = 0.5, H_c = 2.0, W_1 = 0.02, W_c = 2$



$$(g) H_1 = 0.5, H_c = 2.0; W_1 = 5, W_c = 2$$



$$(h) H_1 = 5.0, H_c = 2.0; W_1 = 0.02, W_c = 2$$



$$(i) H_1 = 5.0, H_c = 2.0; W_1 = 5.0, W_c = 2$$

图 2-10 采用不同逃逸函数控制参数时 9 片照相物镜的全局优化进程

以垂轴像差平方和做为评价函数对同一照相物镜进行优化,系统最初局部优化的评价函数值为 2.33。采用不同的逃逸函数控制参数,在相同的优化时间内,搜索到的光学系统总数与其最小的评价函数值见表 2-3。表中第二个优化进程采用了本章推荐的缺省值,虽然其搜索到的光学系统数略少于第三个进程,但该进程所找到系统评价函数最小,由此可知推荐的控制参数缺省取值对这类评价函数也基本适用。

表 2-3 以垂轴像差平方和为评价函数的全局优化结果

H_l	H_c	W_l	W_c	Number of solutions	Minimum merit function value
0.02	2	0.10	2	11	4.98E-02
0.50	2	0.10	2	13	2.64E-02
4.00	2	0.10	2	15	5.32E-02
0.02	2	0.02	2	5	4.51E-01
0.02	2	5.00	2	2	7.69E-01
0.50	2	0.02	2	4	4.98E-01
0.50	2	5.00	2	10	1.41E-01
5.00	2	0.02	2	7	5.35E-01
5.00	2	5.00	2	12	2.37E-01

2.4 逃逸函数算法的程序实现

逃逸函数全局优化算法以及本章探讨的各项提高优化效率的措施已在北京理工大学研制的 GOLD (General Optical Lens Design) 软件中得到实现。GOLD 原名 GOSA, 是在国家自然科学基金委员会的长期支持下研制的实用化的计算机辅助光学设计大型软件包^[79]。它不但可以对传统的对称光学系统进行分析优化,而且可以处理各种非对称、非常规光学复杂系统。

在 GOLD 软件中,发展了物像空间正则归一化坐标理论^[92],并将其应用于非常规复杂光学系统的分析设计^[93],因而在系统的入瞳和出瞳之间建立了 1:1 的对应关系,即入瞳上的一个规则网格追迹到出瞳后仍为一规则网格。这个性质使我们得以从少数几条光线的追迹结果计算出瞳波面波像差的均方差,并把它表示成公式(2-2)所示的抽样光线像差的加权平方和的形式^[94]。波像差均方差本身有着明确的物理意义,它与建立在衍射理论基础上的像质指标——像点中心亮度有着直接的联系。因此,用它做为优化评价函数,可以加强优化计算的理论依据,从而提高光学系统(特别是高像质要

求的系统)的设计质量。

在用 GOLD 软件对光学系统进行优化设计时,使用者可以根据需要选用上述波像差均方差或传统的几何像差平方和做为评价函数;可以选取复杂光学系统中任何种类的结构参数做为优化变量;可以按要求控制系统的焦距、后工作距、放大率和其它各种高斯光学参量,以及三级像差系数、镜片中心及边缘厚度、系统总长、玻璃变化区域、鬼像及红外扫描成像系统中的冷反射强度等等。程序可以方便地处理多重结构系统、折反射系统、对称系统中经常遇到的关联参数问题,保持它们的同步变化;可以在每一迭代中自动选取最佳像面位置,以便正确地评价当前系统的质量。在选用全局优化时,允许使用者设置优化最大用时,改变逃逸函数控制参数的缺省值,修改(2-6)式中计算两组解在结构变量空间的加权均方根距离时所用的不同结构变量类型的权因子,选取区分两组不同解的预设阈值,等等。

2.5 设计实例

图 2-11 画出了使用 GOLD 软件对上文中的 6 片反摄远物镜进行全局优化找出的一些较好的结构形式。图中的数值表示相应的评价函数值。优化共使用了 36 个变量,包括系统中所有的光学面曲率、轴向间距、玻璃材料折射率和色散系数。为了使设计结果与原始专利相符,优化中加入了对系统焦距、最小后截距、最大总长、畸变、镜片中心与边缘厚度、玻璃变化区域的控制。程序在主频为 2.2GHz 的 Pentium 4 微机上运行。把专利数据作为初始结构,最初局部优化的评价函数值为 9.04。用逃逸函数算法找到一些比原专利更好的解,其中最好的两个设计分别是在优化开始后 26 分钟和 14 分钟得到的。图 2-11 中列出的其它一些解(如图中的左下角和右下角)的评价函数值虽然略高,比原专利的像质略差,但其结构形式十分紧凑,为设计者拓宽了设计思路,提供了选择的余地。

图 2-12 所示的设计实例为一个工作在可见光波段的扫描物镜。优化时采用的初始结构为等厚度的 K9 平板玻璃,只把最外边的一对设为平凸透镜以满足系统的焦距要求。系统中所有的结构参量都作为优化变量,但根据系统 1:1 的工作特性并为加工方便,用 GOLD 软件中的关联参数将其结构控制为相对光阑对称的形状。用软件中提供的一般边界条件控制镜片中心与边缘厚度,并把材料参数限制在常用玻璃区域内,用特殊边界条件固定系统总长和放大倍率。图中左上角所示结构和数字为用阻尼最小二乘法进行局部优化得到的结构和评价函数值;采用全局优化后,程序在数十分钟内自

动陆续找到图中所示一系列更好的优化结果。

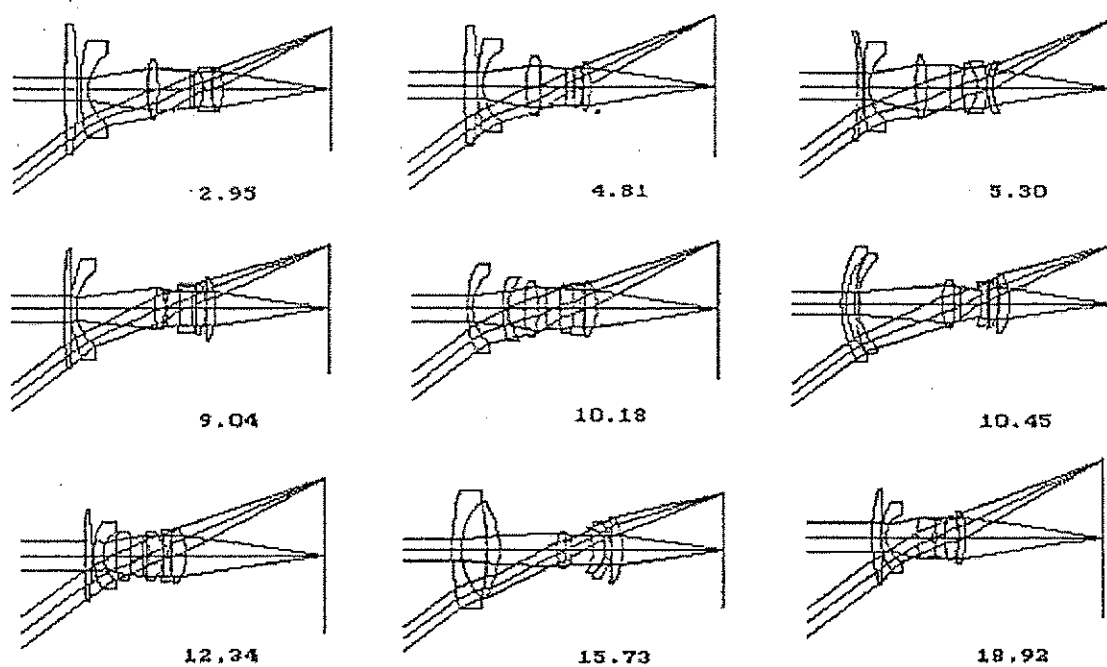


图2-11 6片反摄远物镜的全局优化结果（图下数字为对应的评价函数值）

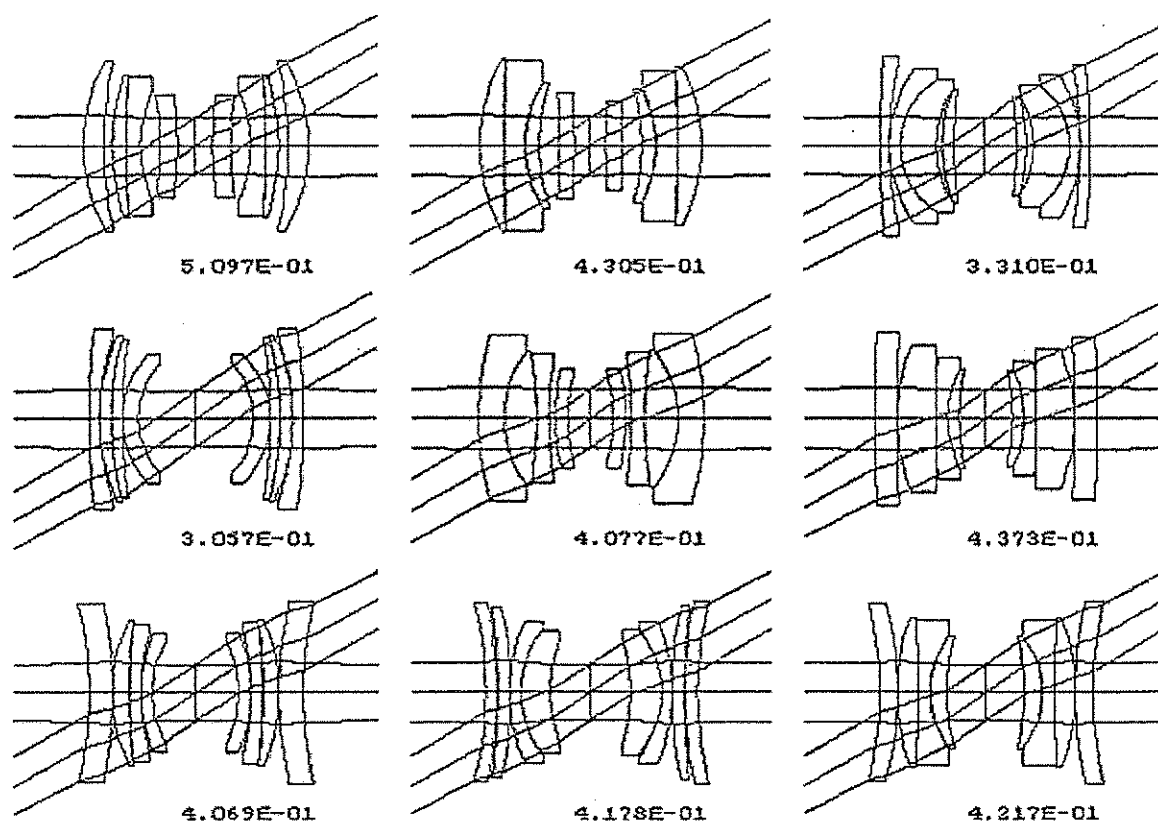


图2-12 扫描物镜的全局优化结果（图下数字为对应的评价函数值）

2.6 本章小结

本章从两个方面对基于逃逸函数的全局优化算法做了重大改进：①基于这种全局优化的运行是由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成的特点，创造性地提出了搜索最佳阻尼因子和解向量的最优长度两个搜索机制，提高了局部优化的收敛速度。②通过大量实验确定了逃逸函数中的控制参数的最佳取值，保证了逃逸过程的高效高速。上述改进大大提高了逃逸函数全局优化算法的效率，使其完全满足了实用要求。这方面的工作得到了逃逸函数算法创始人，日本著名光学设计专家一色真幸教授的高度评价，他称赞我们在理论和实际两个方面发展和完善了他提出的算法，有关论文已与一色教授联名在《光学学报》上发表。

上述研究成果已成功地应用于GOLD软件，使其成为国内第一个带有全局优化功能的光学CAD软件。此部分功能自2000年下旬起开始在国内推广应用，已被多个单位实际用于多种军用和民用光学系统的优化设计，均取得了满意的结果。

第三章 优化进程中自动增减光学元件的机制

目前国内外光学CAD软件提供的各种全局优化算法^{[95][96]}的一个共同局限,是不能根据需要自动增减光学元件,而只能在给定的系统初始结构的片数和形式(胶合或分立)下寻找最优设计。初始结构的正确选择与光学设计人员的经验密切相关。如果选择的结构和元件片数从理论上根本不能满足该系统的光学特性和像质要求,即使计算速度再高,优化时间再长,直至真正搜寻到了评价函数的全局最优值,也无法达到设计要求;反之,如果选择的系统结构过于复杂,则会提高制造成本,造成浪费。

在利用现有软件设计光学系统时,增加或删除光学元件仍需要设计人员人工干预,工作效率低,在经验不足时此操作带有较大的盲目性。因此建立一种可靠的能够在优化过程中根据需要自动增减元件的机制是十分必要的。

本章介绍了用遗传算法改变系统光学元件个数的方法,指出了该算法存在的问题。提出了国际上第一个不含随机性算法的自动增减面机制,选取镜头形态参数 W 和 S 作为判据,介绍了该对参数的定义,证明了它们作为增减面判据的适用性,通过大量实验验证了新机制的可行性。

3.1 遗传算法和零光焦度算子

遗传算法是已发表的光学系统全局优化算法中唯一在理论上有可能改变系统中光学元件个数的算法。为此, Betensky^[97]提出可采用表3-1中列出的零光焦度算子,并用此方法对一个投影镜头进行了设计。具体做法是:以一个单透镜作为基准透镜。根据系统光学特性要求,选择了10个零光焦度算子,其中包括镜片弯曲、元件翻转、将单透镜变为双胶合、加非球面、加场镜、加新月型厚校正透镜、加非球面校正板、移动光阑位置、删除零光焦度元件等操作,将其编码为二进制字符串 $A = a_1 \dots a_i \dots a_{10}$ 作为遗传算法的染色体,其中算子 $a_i (i = 1, 2, \dots, 10)$ 取值为1或0,值为1时表示第 i 个算子起作用,反之则第 i 个算子不起作用。对各算子随机取值生成一组字符串(染色体),分别解码并作用于基准透镜,即在基准透镜的基础上,依据字符串每个算子的取值和算子对应的零光焦度操作对系统进行修改,生成不同的初始结构作为种群的第一代。下一代则利用遗传算法对当前字符串进行选择、杂交和突变产生。表3-2给出了第一代染色体配对和杂交情况,由于第2、第5和第6个结构有较小的评价函数值,即有较大的“适度函数值”,因此被选择、复制并作为“父母”衍生下一代,表中括号指出配

对的对应字符串，竖线处为杂交点，其衍生的第二代字符串及评价函数见表3-3。

表3-1 常用零光焦度算子

Name	Description
Bending	Element shape is increase or decreased by a specified large increment
Flip element	An element is reversed about its center, if such a flip can satisfy the zero power condition
Flip group	A group is reversed about its center, if such a flip can satisfy the zero power condition
Field flattener	A plano-concave (or convex) lens at the image plane which removes all Petzval curvature
Thick corrector	A thick meniscus inserted into an available internal air-space, convex to image or object
Thick corrector external	A thick meniscus added to the long conjugate side, convex to image or object
Aspheric corrector	A zero power corrector inserted or added
Aspheric surface	A given surface is replaced by an asphere which eliminates its dominate aberration
Stop position	The surface number of the stop is changed
Element or group removal	A zero power group or element is removed
Compound color aberration	A single element is replaced by a positive-negative combination having different Abbe values
Compound aberration	A single element is replaced by a positive-negative combination having different refractive indices
Split	An element is split into two elements
Thick lens replacement	A single thick element is replaced by the equivalent two thin elements

表3-2 第一代染色体的选择、随机配对和杂交

String no.	Operator number										Φ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
2	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	2.5
5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	.27
5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	.27
5	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	.27
6	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	.37
6	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	.37

表3-3 第二代染色体和评价函数值

String no.	Operator number										Φ
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1.22
2	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	.14
3	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	.14
4	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	.13
5	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	.14
6	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	.12

在上述算法中, 由于一些零光焦度算子表示插入或删除光学元件, 在优化进程中能够自动生成具有不同光学元件数的系统结构。但是, 遗传算法在实现的过程中, 完全抛开现有设计, 依靠随机机制生成新的结构, 算法本身的盲目性很大, 产生合理系统的结构要依靠零光焦度算子的正确选取, 需要深厚的光学设计经验 (Betensky本人是国际著名的光学设计专家)。从表3-3给出的第二代染色体可以看出, 其中评价函数较小的几个光学系统均采用了遗传算子1所代表的场镜。选择不当或漏选关键的遗传算子, 可能无法得到当前光学性能要求下的“最佳”光学结构。因此这种算法只能作为一种学术上的探讨, 实用化程度差, 很难用来提高现有优化软件的智能化程度。

3.2 光学元件的自动增减机制

光学设计的目的是通过对光学系统中各个元件的结构参数优化实现整个系统的像差平衡。当优化结果不能满足像质要求时, 很可能是因为光学元件的数量过少, 无法达到系统所需的像差平衡。本文试图建立一种在优化过程中根据需要自动增减元件的机制, 通过分析当前设计中的造成像差不平衡的“内应力”^[98], 在合理的位置插入新的光学元件; 通过分析各元件在系统中承担的光焦度和对像差平衡的必要程度, 自动找到和去除其中的冗余。其中需要解决的关键问题是为该机制选择合适的判据。

在查阅文献和大量试验的基础上, 我们选用了镜头形态参数 W 和 S 。

3.2.1 镜头形态参数 W 和 S

镜头形态参数 W 和 S 的计算基于近轴光线追迹, 而且不随光学系统的尺寸、孔径、视场角和共轭条件变化^[99]。

参数 W 描述系统中各个光学面的光焦度分配情况, 其定义为:

$$W = \left(\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K w_j^2 \right)^{1/2} \quad (3-1)$$

其中 K 为系统中的光学面总数, w_j 为光学面 j 的“归一化”光焦度:

$$w_j = -\frac{n_j' - n_j}{1 - m} \frac{y_j}{n_j' u_K'} C_j \quad (3-2)$$

式中 n_j 、 n_j' 表示第 j 面前后的折射率, C_j 为该面曲率, y_j 为近轴边缘光线在该面上的投射高, m 为整个系统的放大率, 而 $n_j' u_K'$ 表示像空间折射率与近轴边缘光线与光轴夹角的乘积。

参数 S 评价系统中各个光学面的“对称”程度 (注意本文中的“对称”广义地指光学面与光阑中心同心的程度或者满足齐明条件的程度), 表示为:

$$S = \left(\frac{1}{K} \sum_{j=1}^K s_j^2 \right)^{1/2} \quad (3-3)$$

其中 s_j 的定义为:

$$s_j = \frac{1}{1 - m} \frac{1}{\bar{A}_{stop} (n_j' u_K')} \bar{A}_j (u_j' / n_j' - u_j / n_j) \quad (3-4)$$

u_j 、 u_j' 表示近轴边缘光线在第 j 面折射前后与光轴的夹角, $\bar{A}_j$ 是第 j 面前的介质折射率 n_j 与近轴主光线在该面上的入射角 i_j 的乘积, $\bar{A}_{stop}$ 则为 $\bar{A}_j$ 在光阑面上的值。

Sasian 和 Descour^[99]对大量光学系统计算 W 和 S 值的结果表明, 有较小 W 和 S 值的系统一般具有较好的像差平衡性质, 有提供良好的成像质量的潜力。为了进一步证明此论点, 本文进行了以下实验。

对任意选取的一个 F 数为 3.5、半视场角 40.6° 的照相物镜^[100]在常规的边界条件下用阻尼最小二乘法进行优化。当优化进程进入一个局部极小陷入停滞状态时, 把镜头形态参数 W 和 S 作为罚函数加入评价函数, 保持系统的光学元件总数不变, 接着进行第二次优化, 观察是否能够获得更好的设计。图 3-1 中绘出了第二次优化前与优化

后的系统图, 其相应的光学传递函数 (Modulation Transfer Function, 或 MTF, 取轴上点、0.7 视场和全视场的均方根值) 曲线如图 3-2 所示, 图 3-3 给出了优化前后系统的场曲和畸变, 表 3-4 则列出了优化前后系统的 W 和 S 数值。从图中可以清晰地看出第二次优化在控制畸变量的前提下有效地改善了系统的成像质量, 同时将 W 由 0.95 减小到 0.72, 而 S 的数值则几乎没有改变。本实验结果进一步证明了镜头形态参数可以有效表达设计结果的质量, 适于用作自动增减光学元件的判据。

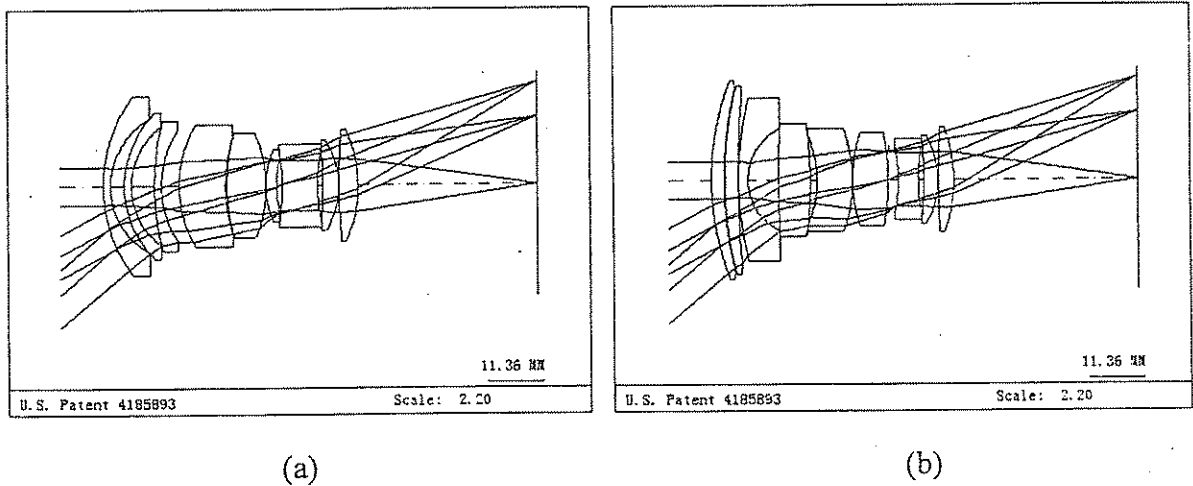


图 3-1 第二次优化前(a)后(b)的系统结构图

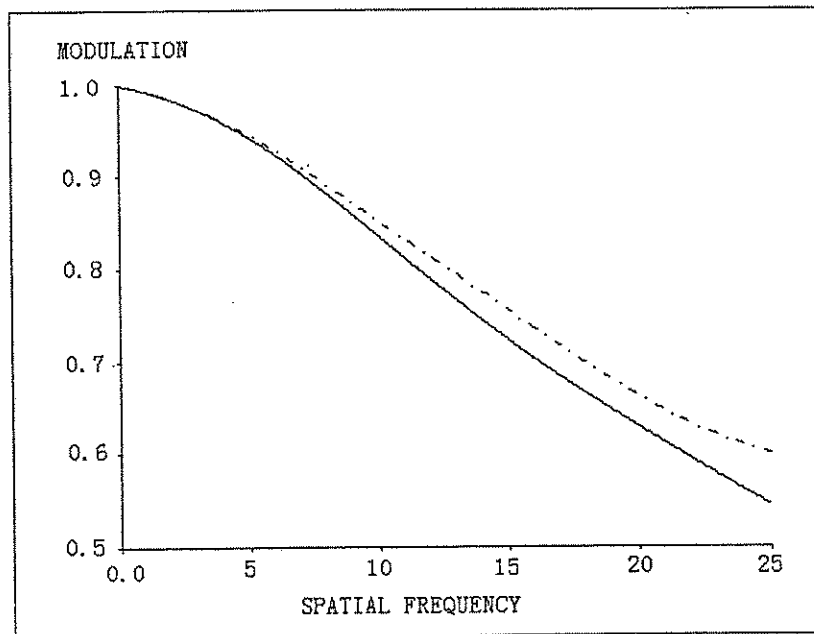


图 3-2. 第二次优化前后系统轴上点、0.7 和 1.0 视场的 MTF 均方根值曲线

—— 初始系统; - - - - 优化系统.

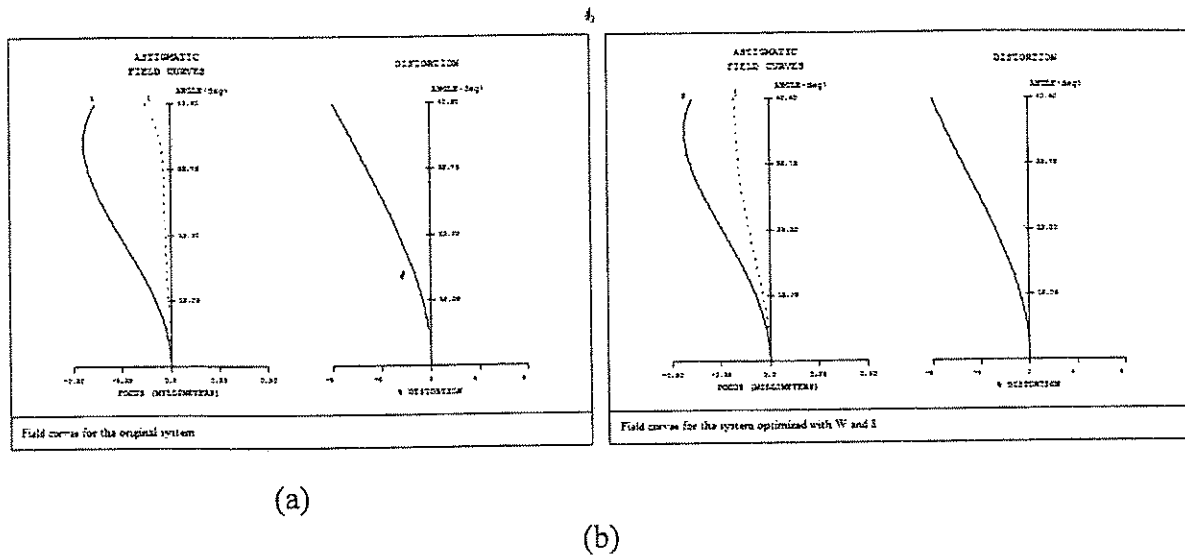


图 3-3. 第二次优化前(a)后(b)系统的场曲和畸变曲线

表 3-4. 第二次优化前(a)后(b)系统的 w_j and s_j 值

Surface no.	Parameter			
	w_{jo}	s_{jo}	w_{jF}	s_{jF}
1	0.45	0.11	0.29	0.12
2	-0.86	0.22	-0.22	-0.07
3	1.06	0.06	0.30	0.06
4	-1.42	0.32	-0.11	0.25
5	0.40	0.36	-0.28	-0.10
6	-1.00	0.04	-1.45	0.75
7	.112	0.20	0.11	0.56
8	-0.95	-0.65	0.29	-0.28
9	0.76	0.67	1.16	0.02
10	1.08	0.79	1.08	-0.08
11	1.56	0.03	0.99	0.55
12	-1.18	0.34	0.53	0.82
13	0.00	0.00	0.00	0.00
14	-0.97	-0.99	-0.76	-0.84
15	-0.75	-0.86	-0.89	-0.97
16	-0.26	0.29	-0.20	0.35
17	1.09	0.26	1.11	0.33
18	0.16	0.00	0.16	-0.04
19	0.70	0.27	0.64	0.39
W or S	0.95	0.47	0.72	0.47

3.2.2 增减光学元件的判据和策略

从 w_j 的定义不难推出

$$\sum_{j=1}^K w_j = 1 \quad (3-5)$$

显然,当所有的 w_j 相等时,即在系统中各个光学面对系统的总光焦度贡献相同的理想情况下,参数 W 的数值将达到最小化,这时各面的光焦度均得到了最高效的利用。但出于像差校正的考虑,实际设计中各个光学面的 w_j 值通常有正也有负。有较大 w_j 值的光学面对系统总光焦度的贡献大,相应地对 W 值的贡献也大;同时,有较强光焦度的光学面一般会引入较大的高级像差。因此,当需要加入一个新的元件,以便推动已经停滞的优化进程,进一步改善系统的成像质量时,应该把新元件添加到具有最大 w_j 值的光学面附近,期望新加入的光学面能够分担此处聚集的光焦度,以在系统中得到一个比较均匀的光焦度分布,进而获得较小 W 值和较好的像差平衡。实验表明我们提出的这种策略在大多数情况下十分有效。

类似的策略也适用于另一个形态参数,在具有较大的 s_j 值的光学面附近插入新面或元件通常可以有效减少 S 的值,改善系统中光学面使用的“对称”程度。当影响系统成像质量的主要因素为与视场相关的像差(如畸变和慧差)时, $S(s_j)$ 应该做为决定新增光学元件位置的主要判据。

镜头形态参数也可以用于自动检测系统中是否存在冗余的光学元件。实验表明,当系统中某个元件的两个光学面(面号分别为 j 与 $j+1$)的 $w_j + w_{j+1}$, s_j 和 s_{j+1} 数值都很小时,删除该元件不会对系统像差平衡产生大的影响。这是因为当元件满足 $w_j + w_{j+1} \approx 0$ 的条件时,它对整个光学系统光焦度基本没有贡献;而 s_j 和 s_{j+1} 小则表明该元件的光学面以一种比较“对称”的形式存在,对像差校正的贡献不大。同时使用 $w_j + w_{j+1}$, s_j 和 s_{j+1} 做为判据,就不会出现把对系统像差平衡起关键作用的零光焦度元件自动删除的错误。

3.2.3 增减光学元件机制的程序实现

本文的研究工作旨在提高光学 CAD 软件的智能化程度和光学设计的自动化程度,需要对提出的新算法、新机制编程实现并应用于实际系统设计以便对其加以验证。美国 Optical Research Associates 公司研制的 CODE V 软件中提供了一个强大的宏语言

[101]功能, 用其编程可以在软件中添加各种新的功能。在编程时可以调用软件中的各种参量、现有的各种运算功能(包括光线追迹、像质评价和结构优化)及其输出结果, 并提供方便的调试、修改手段。这为研究新算法提供了一个理想的工作平台, 使我们可以准确迅速地得到实验结果, 因此本文中的许多算法都是首先用 CODE V 宏语言编程实现并进行测试验证的。

为验证增减光学元件的机制所编的试验程序中包含一个外层循环, 以控制光学系统的优化进程, 当优化进入停滞状态时, 计算各光学面的 w_j 和 s_j 数值以及镜头形态参数 W 与 S , 根据上节提出的策略对系统结构进行调整。

3.3 设计实例

本文在国际上首次提出在光学系统优化过程中自动增减光学元件的机制, 采用了大量实际系统对其加以实验验证。限于篇幅, 这里只列举其中的几个典型实例。

3.3.1 自动增加元件

(1) 三片镜

首先选取相对简单的光学系统 — F 数 4.5、 $\pm 20^\circ$ 视场角的库克三片镜^[102]开展试验。图 3-4(a)画出了对原专利数据进行优化后得到的系统初始结构, 其中光阑面在第三面上。图 3-4(b)为该系统的 MTF 曲线。表 3-5 给出了每一个面的 w_j 和 s_j 数值。

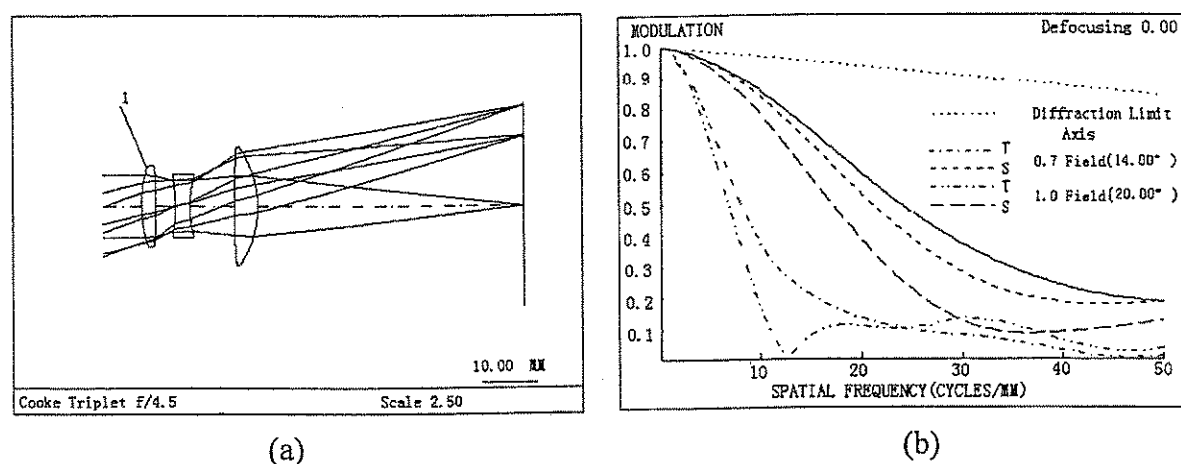


图 3-4 三片镜初始结构(a)与 MTF 曲线(b)

为了改善该系统的成像质量, 根据上节提出的以镜头形态参数为判据的增减元件机制, 在具有最大 w_j 值(见表 3-5)的第 1 面处增加一个新元件。在本文的试验中, 增加元件以在指定面附近放置一个薄玻璃平板的方式实现, 新旧元件之间的初始轴向

间隔为零。对加入新元件的系统进行二次优化,可以使系统传函值得到明显的提高,如图 3-5 所示。

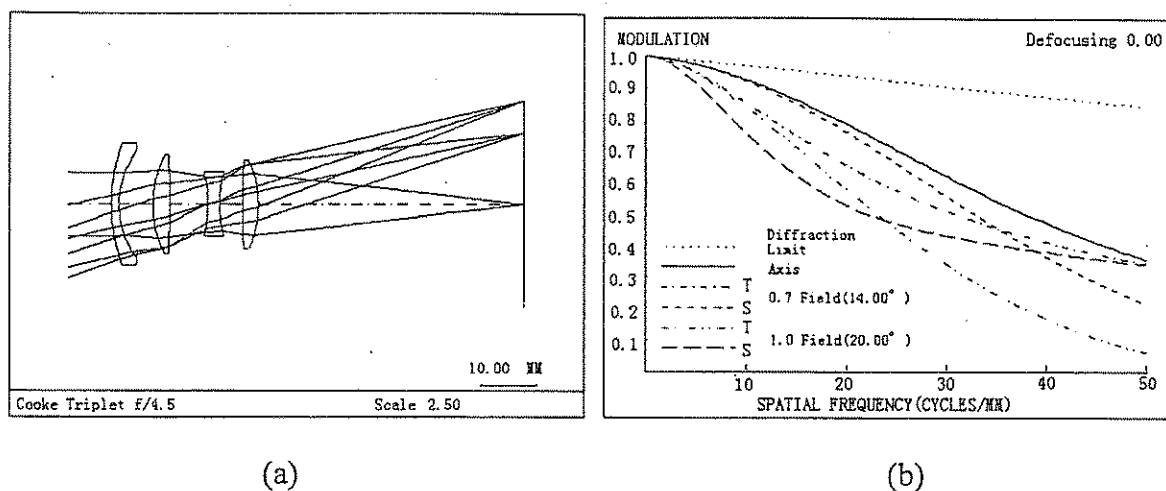


图 3-5 在第 1 面处增加元件并优化后得到的系统结构(a)与 MTF 曲线(b)

表 3-5 三片镜初始结构与在第 1 面处增加元件并优化后得到的系统结构中每个光学面的 w_j 和 s_j , 其最后一列为系统 W 和 S 值

Surface no.	1A1	1A2	1	2	3	4	5	6	W or S
w_{j0}			1.91	0.34	-1.40	-1.79	0.22	1.72	1.41
s_{j0}			0.32	1.48	-1.68	-1.19	0.64	-0.08	1.08
w_{j1}	0.88	-1.46	1.83	0.16	-1.24	-1.21	0.30	1.74	1.24
s_{j1}	0.14	0.14	0.25	1.06	-1.39	-1.32	0.93	0.46	0.86

对三片镜这样的简单系统来说,在系统的任何位置添加新元件都可以改善像质。本文提出的增减元件机制的作用是自动找出其中的最佳位置。为比较验证,分别在三片镜系统的其它五个光学面处增加一个新元件,在同样的评价函数和边界条件下分别对其进行优化,得到五个新的设计结构。在表 3-6 中列出了上述所有六个优化结果在每毫米 30 线对和 50 线对处的 MTF 数值,可以看出在第 1 面处增加元件取得了最好的效果,从而证实了本机制的正确性。

表 3-6 系统不同面附近添加新元件的优化后系统 MTF 数值

Field	30lp/mm						50lp/mm					
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1	S2	S3	S4	S5	S6
AXIS	.623	.611	.629	.611	.601	.606	.356	.341	.335	.378	.300	.376
0.7(T)	.509	.429	.366	.400	.389	.500	.341	.171	.214	.160	.230	.249
0.7(R)	.558	.578	.501	.342	.566	.561	.216	.202	.125	.007	.223	.217
1.0(T)	.341	.323	.294	.154	.283	.205	.160	.168	.015	.174	.065	.044
1.0(R)	.430	.418	.464	.335	.442	.484	.337	.302	.336	.147	.399	.369

(2) 广角镜头

第二个实例为一个广角镜头(美国专利号 4155629)^[103]。首先将专利数据在 CODE V 中针对垂轴像差平方和评价函数进行优化,在优化中对系统的焦距(=36mm)、总长(<84mm)和全视场畸变(<5%)等边界条件进行了控制。为了进行增加光学元件的试验,有意提高了系统的性能要求,将其 F 数从原专利的 3.5 改为 2.5,使其 MTF 值在每毫米 50 线对处下降到 0.15 (见图 3-6)。

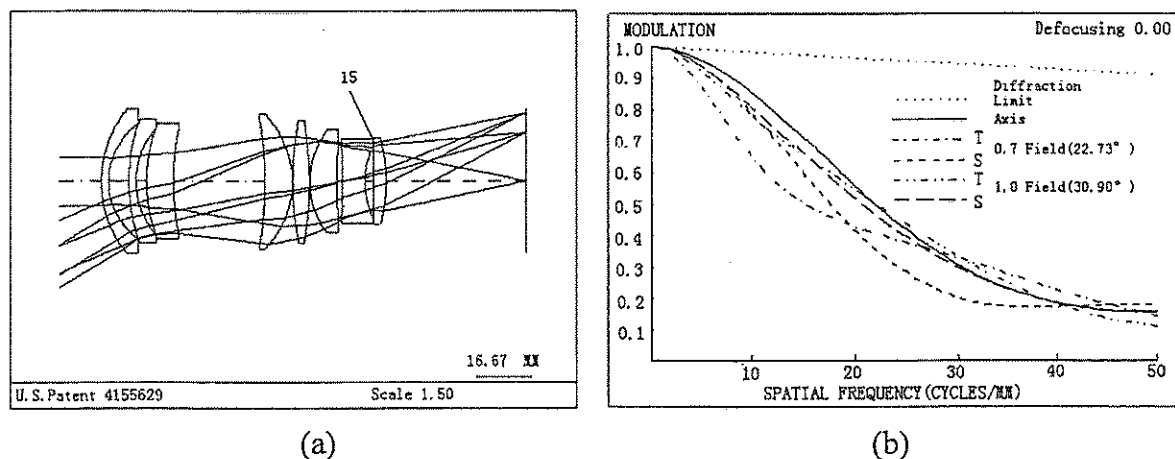


图 3-6 广角镜头初始结构(a)与 MTF 曲线(b)

此时该系统的第 15 面有最大的 w_j 值,根据上节提出的增减元件机制,在该面附近添加了一个新元件。对增加元件后的新系统采用同样的边界条件进行优化时,整个视场的 MTF 曲线得到迅速提高,在每毫米 50 线对处提升到 0.3 以上,图 3-7 中给出了优化后的系统图及其 MTF 曲线。

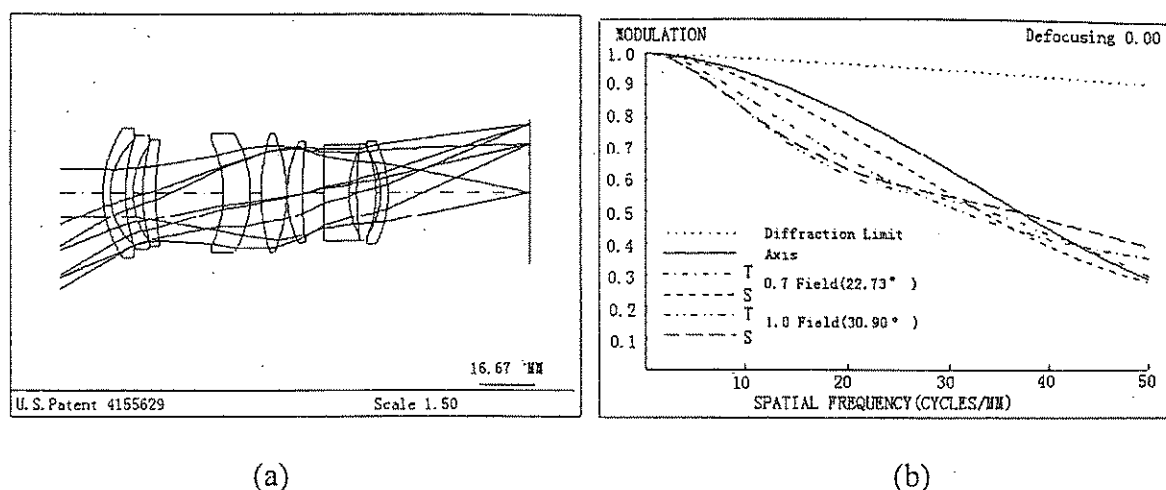


图 3-7 在第 15 面处增加元件并优化后得到的系统结构(a)与 MTF 曲线(b)

表 3-7 给出了广角镜头初始结构(用下标 O 表示)和最终优化结果(下标 F 表示)中各个光学面的 w_j 和 s_j 数值, 其中第 13 面为光阑面, 第 16 和 17 面构成新增元件。从表中可以看出, 在增加元件后, 系统中的 w_{15} 和 s_{14} (初始结构中的最大 s_j) 明显减小, 进而使系统的 W 值从 0.76 降至 0.73, S 值从 0.61 降至 0.49。

表 3-7 增加元件前后广角镜头的 w_j 和 s_j 值

Surface no.	Parameter			
	w_{jo}	s_{jo}	w_{jF}	s_{jF}
1	0.75	0.00	0.75	0.07
2	-1.17	0.80	-0.99	0.65
3	0.49	0.08	0.40	0.18
4	-1.05	1.10	-0.97	0.91
5	0.69	-0.34	0.50	-0.02
6	-0.42	-0.18	-0.36	-0.33
7	-0.24	0.21	-0.72	0.09
8	1.04	0.59	0.72	-0.08
9	0.34	0.07	0.51	0.41
10	0.30	0.51	0.73	0.74
11	1.29	0.09	0.98	0.03
12	-0.17	0.97	-0.22	0.72
13	0.00	0.00	0.00	0.00
14	-0.13	-1.33	-0.07	-1.02
15	-1.36	-0.21	-1.21	-0.43
16			-0.27	0.02
17			0.86	0.46
18	0.03	-0.26	-0.98	-0.17
19	0.61	0.68	0.80	0.39
W or S	0.76	0.61	0.73	0.49

3.3.2 自动分离双胶合

对于含有双胶合透镜的光学系统，在优化进程停滞不前时，可以考虑将双胶合透镜拆开变成分立元件，相当于新增了一个光学面，为优化中增加了自由度，通常可以起到与增加光学元件类似的提高系统像质的作用。

(1) 照相物镜

本节中选取的大视场大孔径 (F 数为 2.0) 照相物镜 (美国专利号 2,955,513) [104] 中含有三个双胶合透镜，见图 3-8。当我们在试验中把该系统的视场角从原来的 $\pm 31^\circ$ 提高到 $\pm 37^\circ$ 时，全视场处的畸变增大到难以接受的 11.4%。

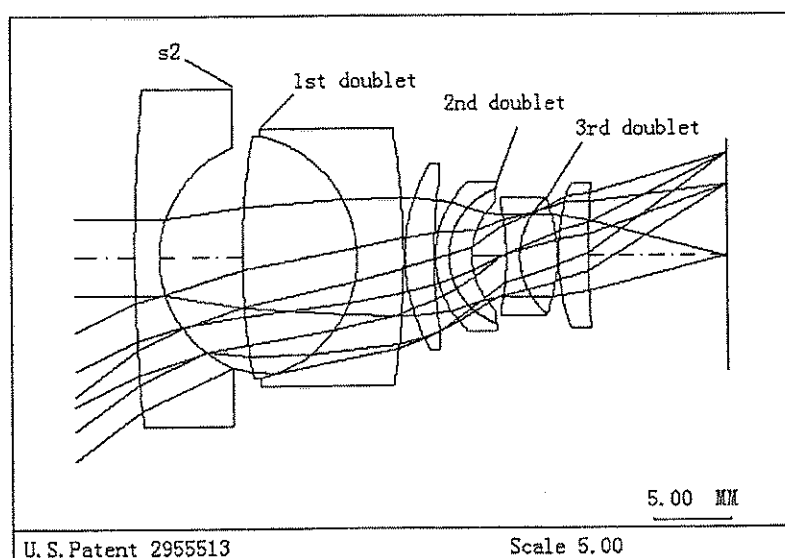


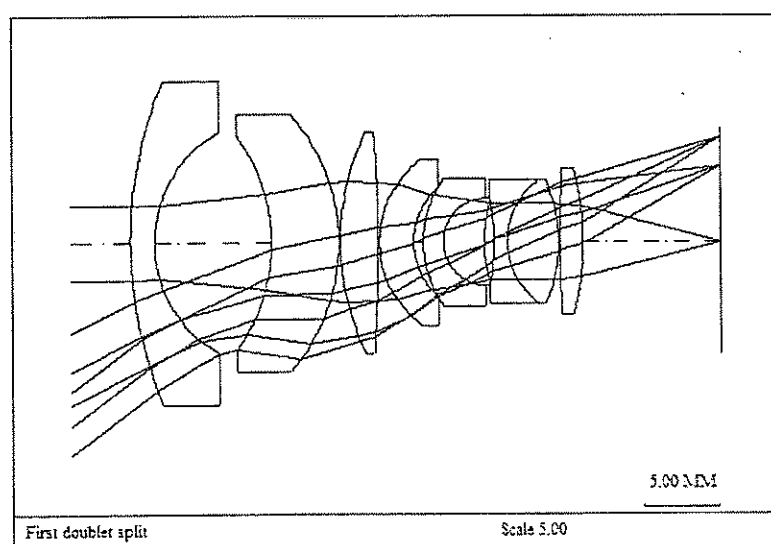
图 3-8 照相物镜初始结构

为改善系统的成像质量，考虑分离系统中的某一个双胶合透镜，为优化计算增加一个光学面曲率变量。由于本设计中畸变是影响成像质量的关键因素，选取新增光学面的位置时应试图减小描述系统“对称”性的镜头形态参数 S 。表 3-8 中的第一行数据给出了初始结构中各面的 s_j 值，其中 $s_2=0.61$ 为最大值，根据本文提出的增减机制，应该分离图 3-8 中处于第 2 面附近的系统中第一个双胶合。

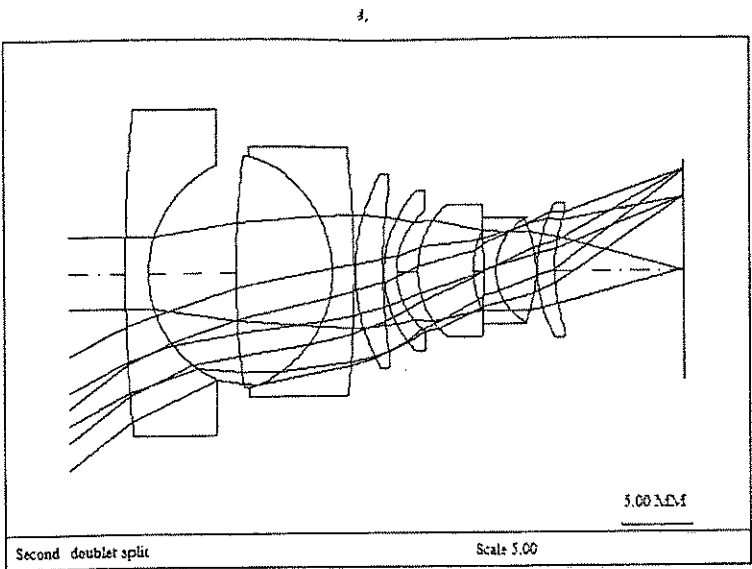
表 3-8 照相物镜初始结构和在三个位置分离胶合面并优化后得到的系统结构各面的 s_j 值

Surface no.	1	2	3	4	4A	5	6	7	8	9	9A	10	11	12	13	13A	14	15	16	S
Initial system	0.02	0.61	0.10	0.13		0.04	0.08	0.21	0.05	0.00		-0.17	0.00	-0.41	-0.01		0.38	-0.23	0.53	0.27
1 st doublet split	0.04	0.35	0.00	0.11	0.05	0.19	0.01	-0.04	0.15	0.00		-0.01	0.00	-0.38	0.00		0.33	-0.34	0.38	0.21
2 nd doublet split	0.02	0.59	0.11	0.12		-0.01	0.06	0.13	0.04	0.04	0.12	-0.23	0.00	-0.21	-0.01		0.42	-0.28	0.51	0.25
3 rd doublet split	0.02	0.59	0.09	0.12		0.06	0.08	0.25	0.04	0.00		-0.14	0.00	-0.45	-0.55	0.51	0.39	-0.25	0.53	0.33

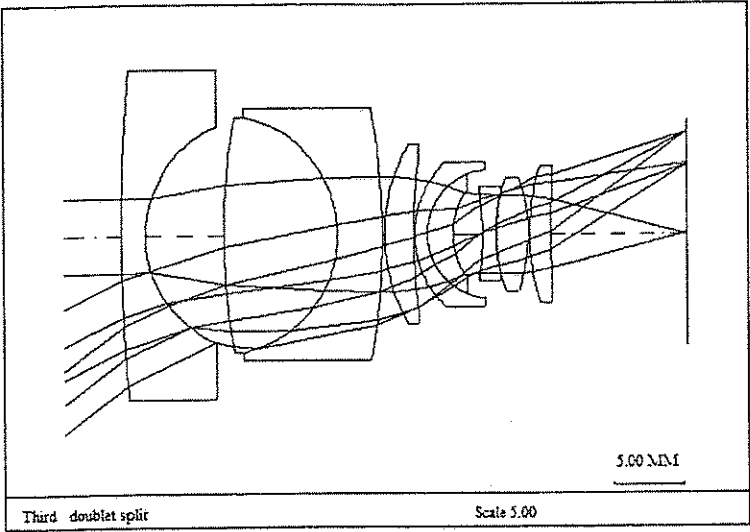
为验证本机制所确定的双胶合分离位置的合理性, 在实验中将系统中三个双胶合透镜分别分离, 得到三个新系统。在同样条件对其分别进行优化: 对镜片中心厚度、边缘厚度以及玻璃变化区域施与相同的边界条件, 要求系统焦距等于 10mm、最小后截距大于 9mm、最大总长小于 30mm, 把系统的畸变以惩罚函数的形式加入评价函数。三个系统优化后的结构形式见图 3-9, 其中 (a)、(b) 和 (c) 分别为分离第一、第二和第三个双胶合并优化后的结果。图 3-10(a) 中画出了包含初始系统在内的四个系统的 MTF 曲线 (轴上、0.7 和 1.0 视场的均方根), 相应的畸变曲线见图 3-10(b)。从图中可以清晰地看出分离第一个双胶合所得到的系统像质最佳, 表 3-8 显示这时 s_2 从 0.61 减小到 0.35, 而 S 的值也由 0.27 减小到 0.21, 是四个系统中最小的。



(a)



(b)



(c)

图 3-9. 分离第一(a)、第二(b)、和第三(c)双胶合并优化后的系统结构

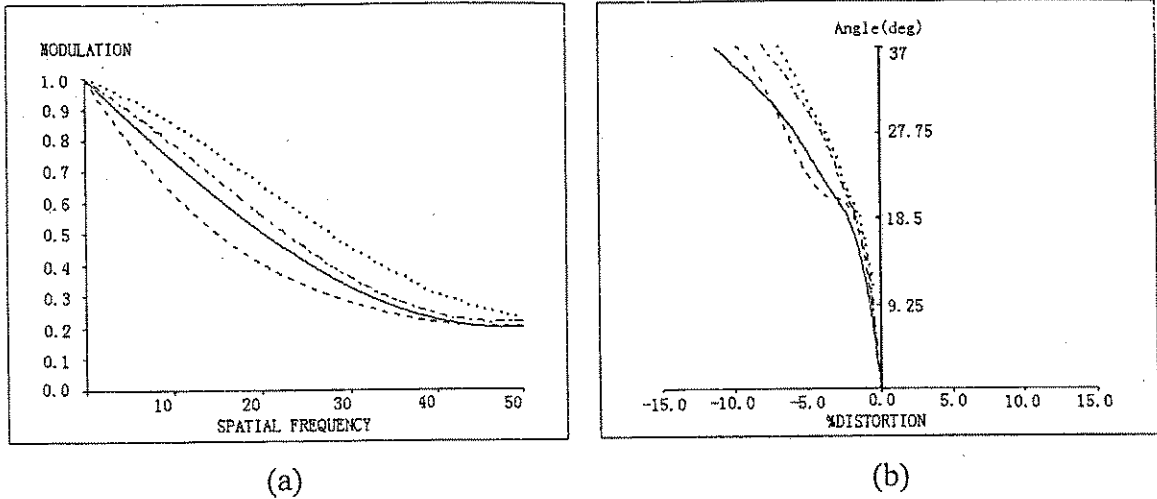


图 3-10. 优化前后照相物镜的轴上点、0.7 和 1.0 视场的 MTF 均方根值曲线(a)和畸变曲线(b)

—— 初始系统; 分离第一个双胶合得到的系统
 - - - - - 分离第二个双胶合得到的系统; ———— 分离第三个双胶合得到的系统

(2) 光刻机镜头

为测试自动增减光学元件机制在更为复杂的光学系统优化中的应用,我们选取了 5X 光刻机镜头^[105]进行实验。为提高设计难度,将原专利的数值孔径从 0.42 提高到 0.62 并进行了优化,得到的系统结构及相应 MTF 曲线图见图 3-11。

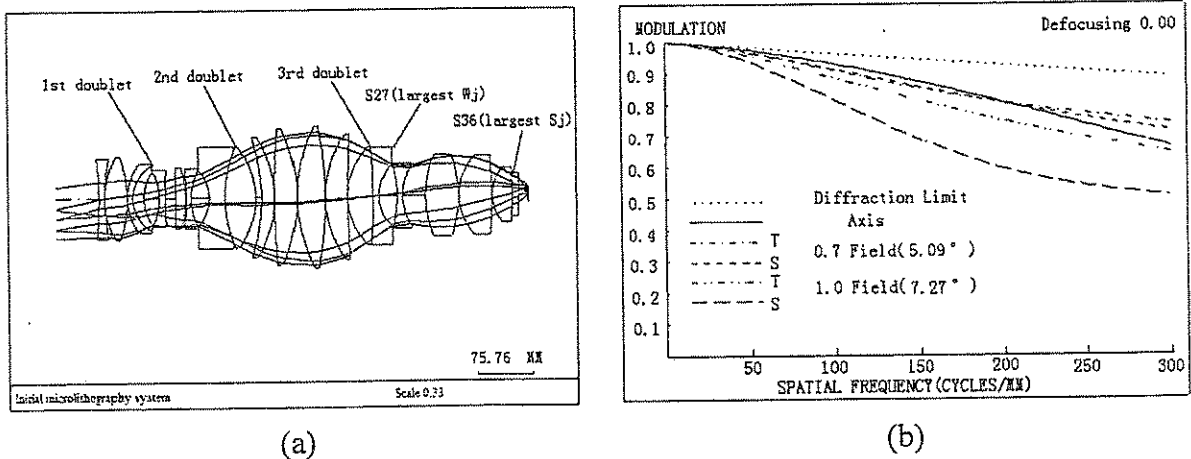


图 3-11. 光刻机镜头初始结构(a)与 MTF 曲线(b)

由于系统的畸变已经得到较好控制,故此把 w 做为确定增加光学元件或光学面的位置的主要判据。从表 3-9 中看出,此时系统中最大的 w_j 在第 25 和 27 面,根据判据考虑分离位于第 26 面的第三个双胶合面,为优化加入一个曲率变量。采用波像差评价函数对分离该双胶合面后的系统进行优化,继续保持对畸变的严格控制 ($<0.1\%$),

其优化结果见图 3-12；图 3-13 给出了分离第一个和第二个双胶合透镜后优化得到的系统结构；图 3-14 中自上而下四条曲线分别表示分离第三个双胶合、分离第一个双胶合、分离第二个双胶合及初始系统的 MTF（轴上点、0.7 和 1.0 视场的均方根），从图中可以清晰看出用本文提出的判据选择的双胶合分离位置为最佳，同时也使 w_j 中较大的值和总的 W 值下降幅度最大（见表 3-9）。

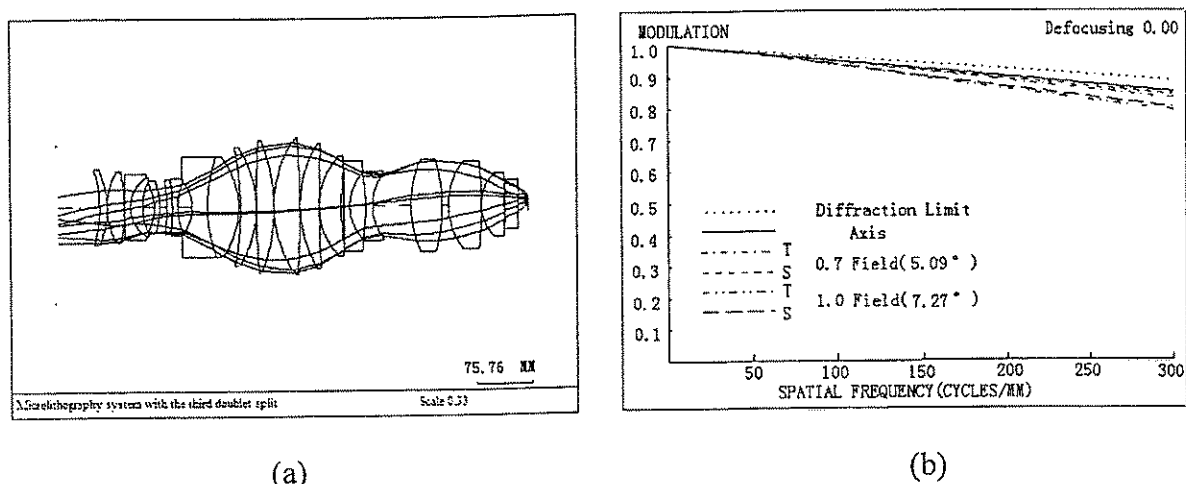
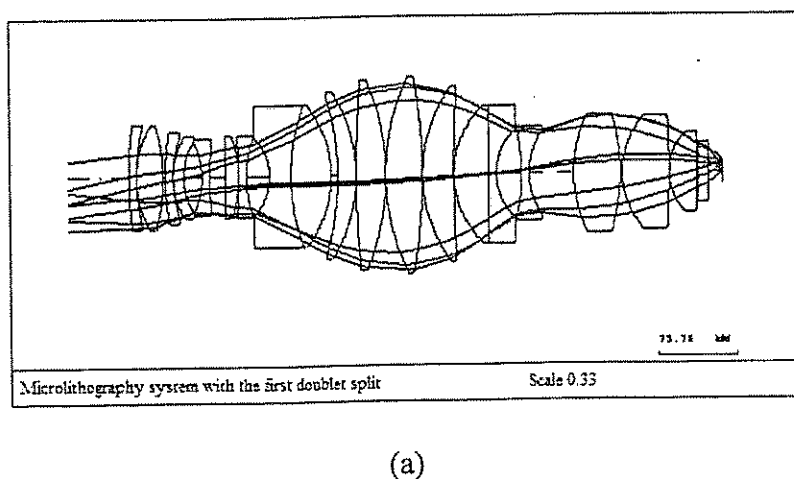
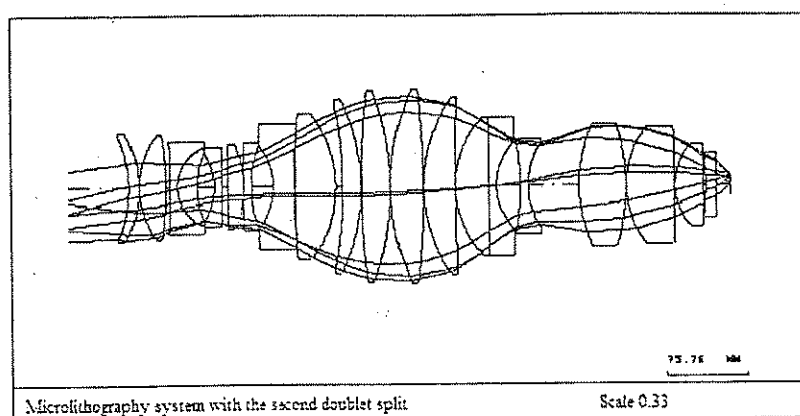


图 3-12 分离第三个双胶合并优化后的得到的系统结构(a)与 MTF 曲线(b)





(b)

图 3-13 分离第一个双胶合(a)和第二个双胶合(b) 并优化后得到的系统结构

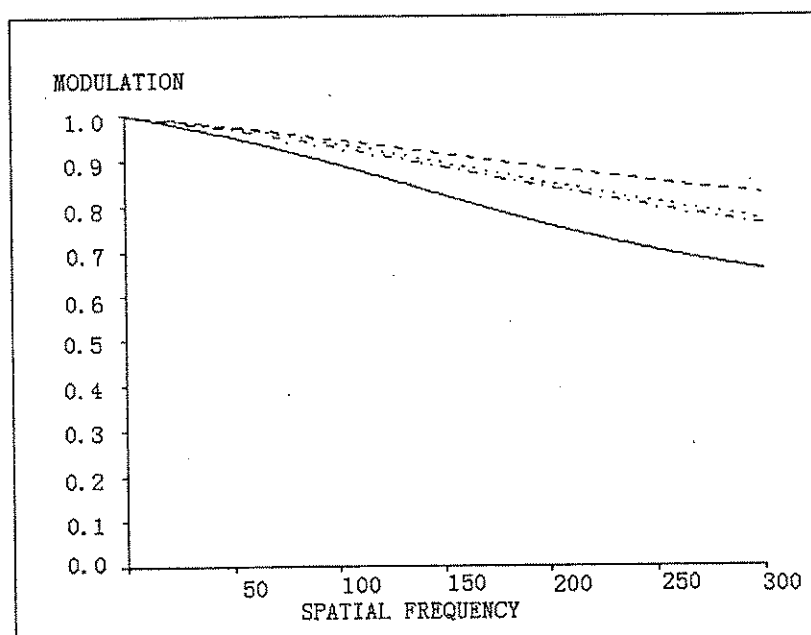


图 3-14. 优化前后光刻机镜头的轴上点、0.7 和 1.0 视场的 MTF 均方根值曲线

—— 初始系统; 分离第一个双胶合得到的系统
 -.-.- 分离第二个双胶合得到的系统; —— 分离第三个双胶合得到的系统

表 3-9. 光刻机镜头初始结构和在三个位置分离胶合面并优化后得到的系统结构各面的 w_j 值

Surface no.	System			
	Initial	1 st doublet split	2 nd doublet split	3 rd doublet split
1	-0.04	0.05	-0.16	-0.12
2	-0.08	-0.09	0.19	0.16
3	0.15	0.15	0.20	0.18
4	0.11	0.09	0.06	0.06
5	0.28	0.07	-0.02	-0.01
6	-0.02	-0.16	-0.03	-0.03
6A		0.25		
7	-0.28	-0.27	-0.24	-0.21
8	-0.23	-0.21	-0.29	-0.22
9	-0.04	-0.04	0.00	0.16
10	0.02	-0.01	0.01	-0.10
11	0.15	0.17	0.22	0.08
12	-0.02	-0.05	-0.01	-0.08
13	-0.25	-0.20	-0.21	-0.19
14	-0.56	-0.58	-0.52	-0.54
15	-0.03	-0.03	-0.06	-0.03
15A			0.03	
16	0.42	0.44	0.44	0.41
17	-0.20	-0.20	-0.13	-0.11
18	0.35	0.36	0.30	0.35
19	0.05	0.05	0.08	0.04
20	0.25	0.25	0.23	0.23
21	0.28	0.27	0.25	0.33
22	0.11	0.11	0.08	0.06
23	0.38	0.39	0.39	0.32
24	-0.04	-0.04	-0.03	-0.03
25	0.53	0.55	0.53	0.49
26	0.00	0.00	0.00	0.00
26A				-0.02
27	-0.66	-0.67	-0.65	-0.57
28	-0.20	-0.20	-0.15	-0.15
29	-0.41	-0.41	-0.44	-0.41
30	0.21	0.21	0.21	0.21
31	0.16	0.16	0.15	0.14
32	0.34	0.34	0.30	0.28
33	0.03	0.03	0.01	0.03
34	0.31	0.31	0.33	0.35
35	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
36	-0.05	-0.05	-0.05	-0.04
37	0.00	0.00	0.00	0.00
W	0.26	0.26	0.25	0.24

3.3.3 自动删除光学元件

前面几个实例证明了利用基于镜头形态参数的增减元件机制在优化进程中自动增加光学元件和光学面的可行性。本节将采用该机制对美国专利 5,694,253^[106]给出的 16 片的 $f/24-85\text{mm} / F3.5-4.5$ 变焦镜头进行优化, 探测并自动删除系统中的冗余元件。优化按常规在三个抽样焦距上 (24mm、45mm 和 85mm) 进行, 加入了对系统焦距、最小后截距、最大总长、最大通光孔径、镜片中心与边缘厚度、玻璃变化区域和轴外视场畸变 ($<5\%$) 等边界条件控制。当优化进程达到一个平稳态时, 得到如图 3-15 所示系统结构, 用本文研制的宏语言程序计算其中各个光学面的 w_j 和 s_j 值, 得到 $w_3 = -0.342$, $w_4 = 0.341$, $w_3 + w_4 = -0.001$, $s_3 = -0.081$ 和 $s_4 = 0.058$, 表明由第 3 面和第 4 面组成第 2 元件满足机制中所给出的删除条件。

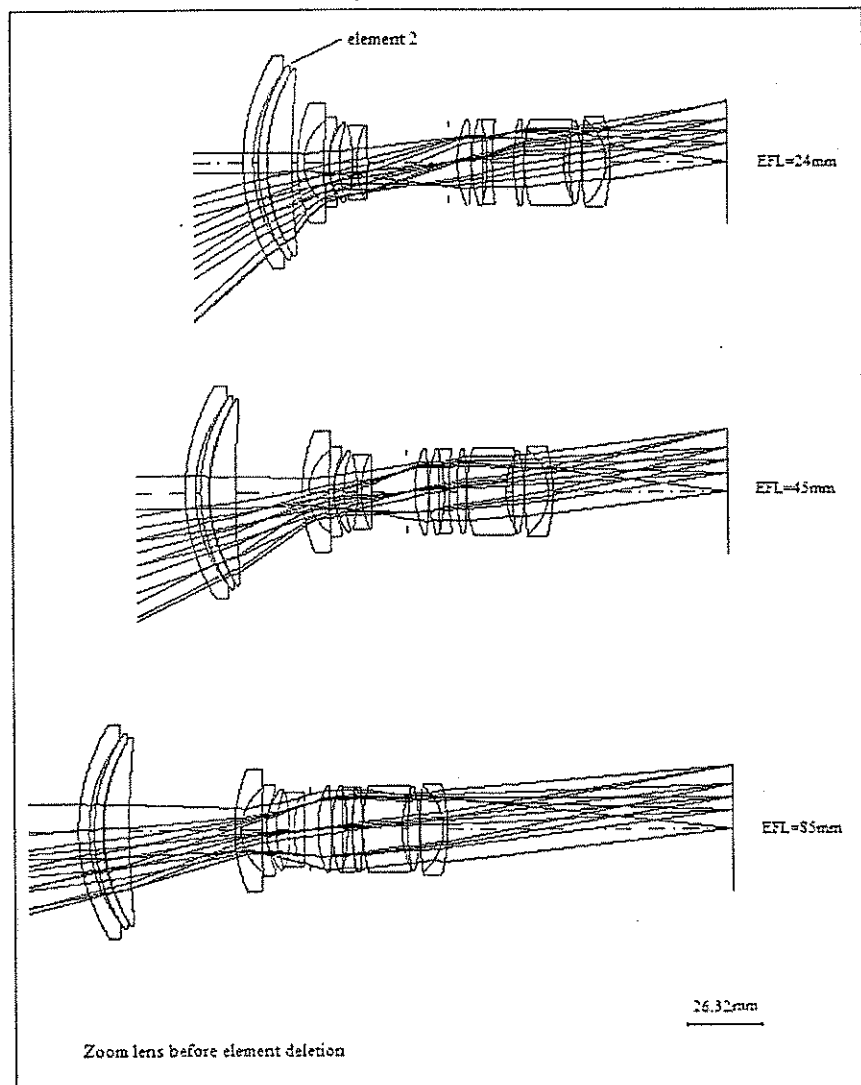


图 3-15 变焦镜头初始结构

用同样的控制条件对删除元件后的变焦镜头做进一步优化,得到的系统结构如图 3-16 所示,该系统与初始结构在特征频率上的 MTF 随焦距变化的曲线见图 3-17。由图中可见,在整个变焦过程中,新老系统之间的 MTF 数值变化在可接受范围内。同时,所有焦距上的畸变数值均控制在 5%以内。镜头形态参数 W 和 S 数值基本保持不变(分别由 1.367 变为 1.371,由 1.527 变为 1.531)。结果证实了第 2 元件的冗余性,以及本文提出的增减元件机制中冗余元件判据的正确性。

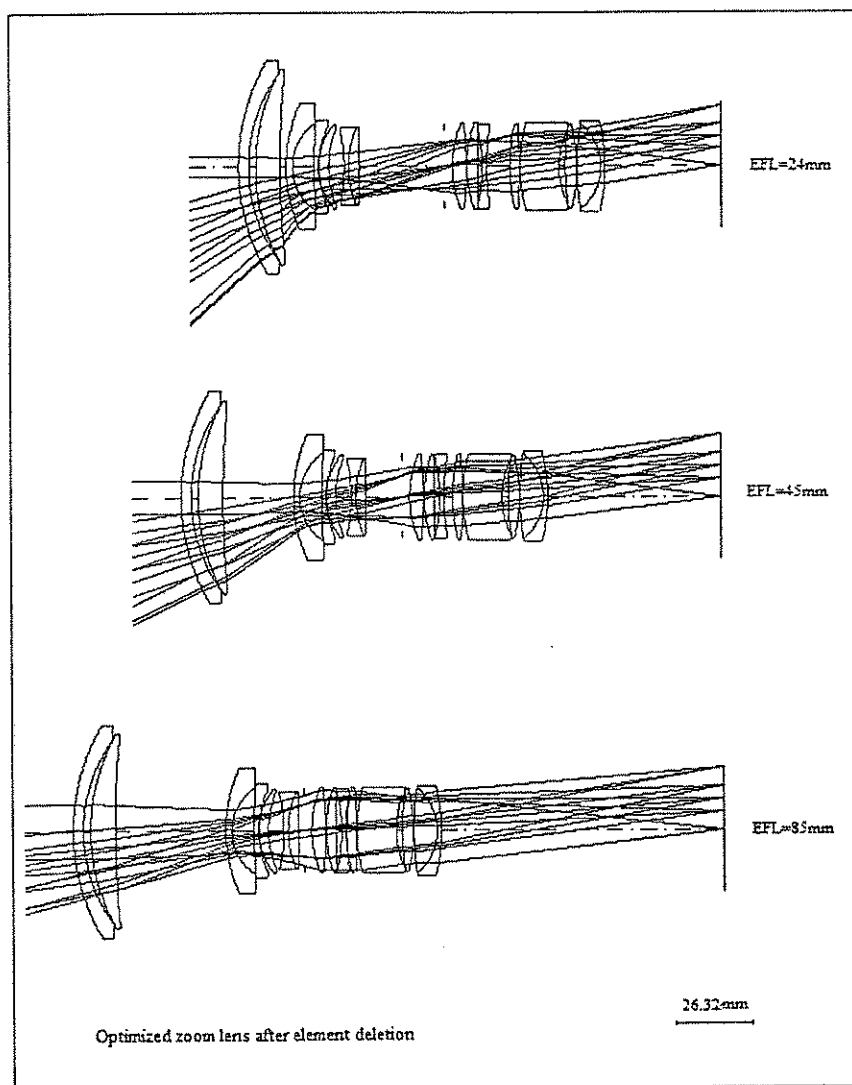


图 3-16 删除第 2 元件并优化后得到的变焦系统结构。

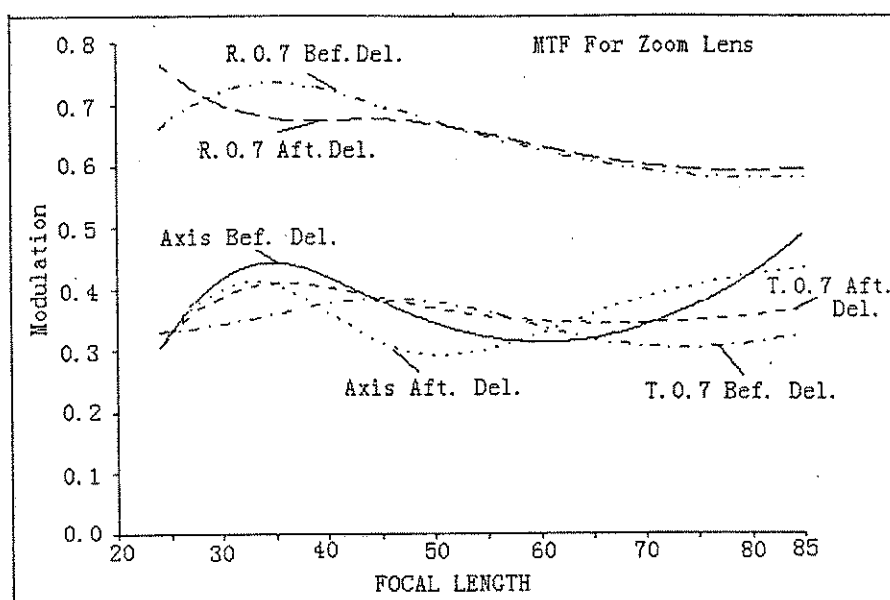


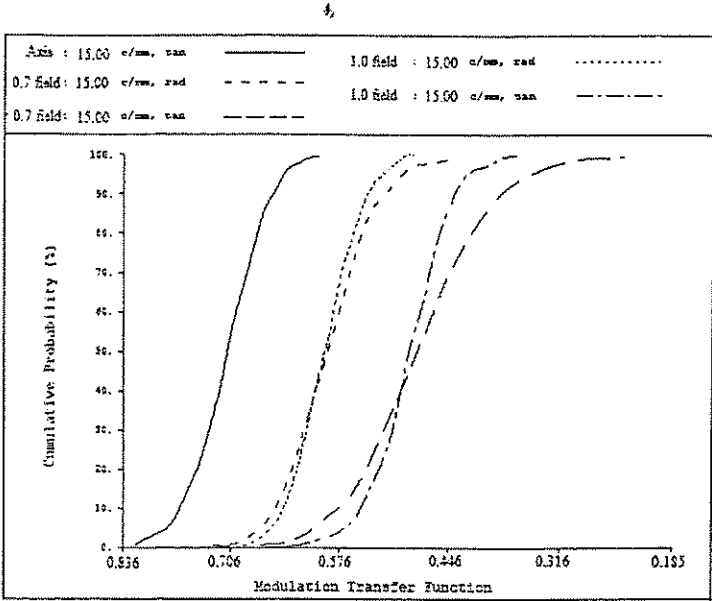
图 3-17 删除第 2 元件前后变焦镜头特征频率上的 MTF 随焦距变化曲线
对轴上点选取的特征频率为每毫米 36 线对；0.7 视场为每毫米 18 线对

3.4 光学元件增减机制对光学系统制造性能的改善

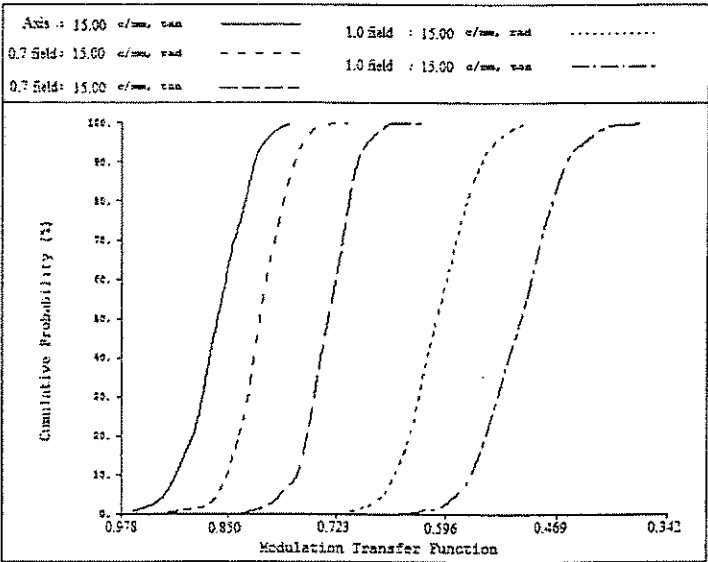
采用本文提出的光学元件增减机制对系统进行优化，可以获得较小的 W 和 S 数值，从而减小了设计结构中造成像差不平衡的“内应力”，可望放宽光学系统对制造公差的要求。本节利用 CODE V 软件对上节中的设计实例进行公差分析，考察元件增减机制在改善光学系统制造性能方面的作用。该软件可以模拟各种加工和装配误差（包括元件面形误差、厚度误差、对心误差、材料参数误差，装配间隔误差、元件和元件组的偏心、倾斜等等）在指定公差范围内的概率分布情况，利用波像差随结构参量变化的解析导数，结合统计学原理，计算出所有制造误差对系统特征频率上 MTF 的综合影响，并绘制出 MTF 值因制造误差下降的累积概率曲线。在以下的实验中，我们将对每组系统设定相同的公差上下限，计算不同设计结构的成像质量对制造误差的灵敏度。

3.4.1 广角镜头公差分析

首先对 3.3.1 节中的广角镜头在每毫米 15 线对的特征频率上进行公差分析。图 3-18(a) 给出了初始结构在特征频率上的 MTF 因制造误差下降的概率曲线，图 3-18(b) 则给出了按本章判据增加光学元件并优化后得到的系统结构的相应曲线。显然，后者在整个视场上有较高的 MTF 设计标称值，同时制造误差对 MTF 的影响也明显减小。



(a)

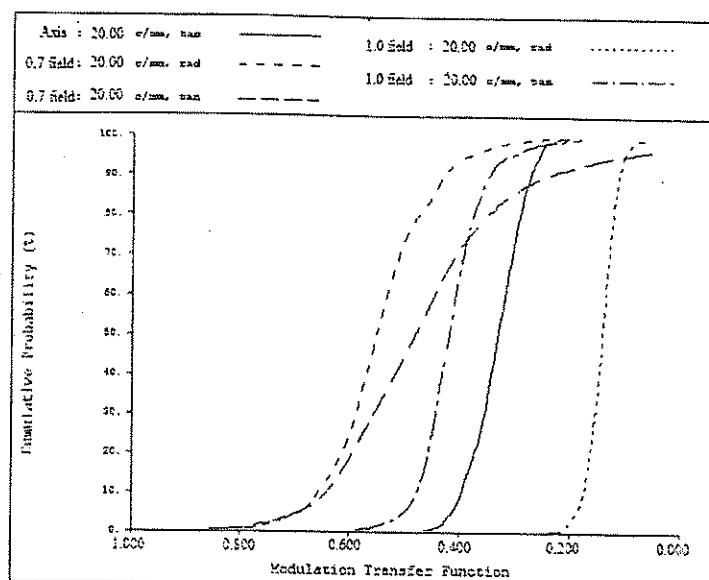


(b)

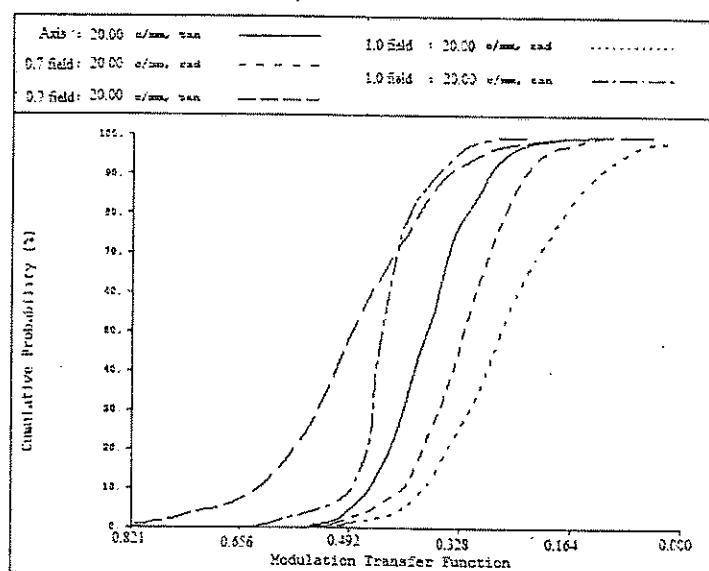
图 3-18 广角镜头初始结构(a)与增加元件并优化后得到的系统结构(b)
的 MTF 值因制造误差下降的累积概率曲线

3.4.2 照相物镜分析

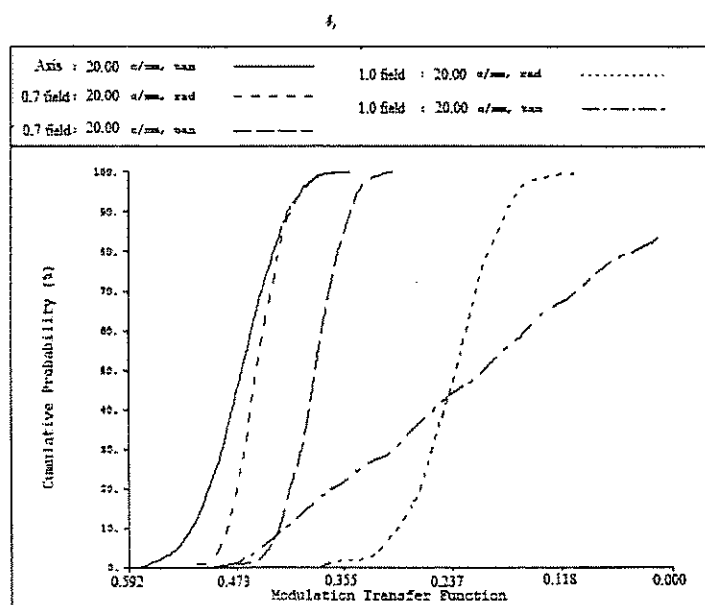
图 3-19 给出了对 3.3.2 节中照相物镜分离第一个、第二个和第三个双胶合并优化后得到的系统结构在每毫米 20 线对的特征频率上的 MTF 的公差分析结果。可以看出，按照本文增减元件机制的判据分离第一个双胶合所得到系统的成像质量对制造误差的灵敏程度较低。



(a)



(b)

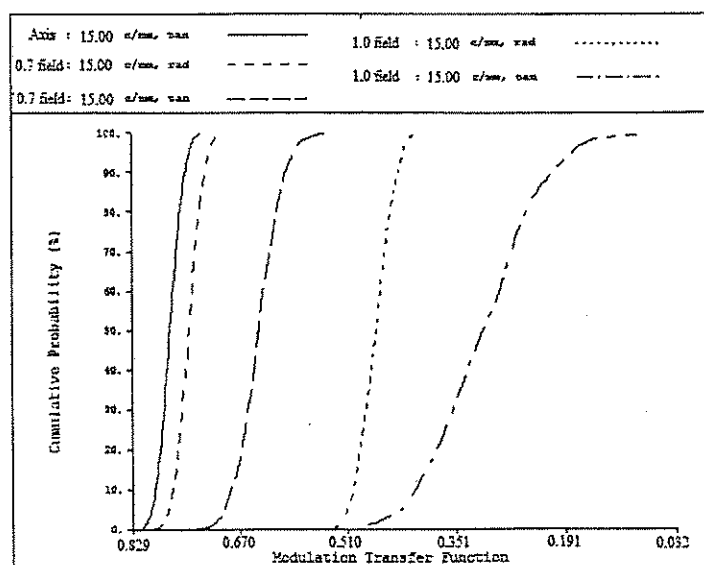


(c)

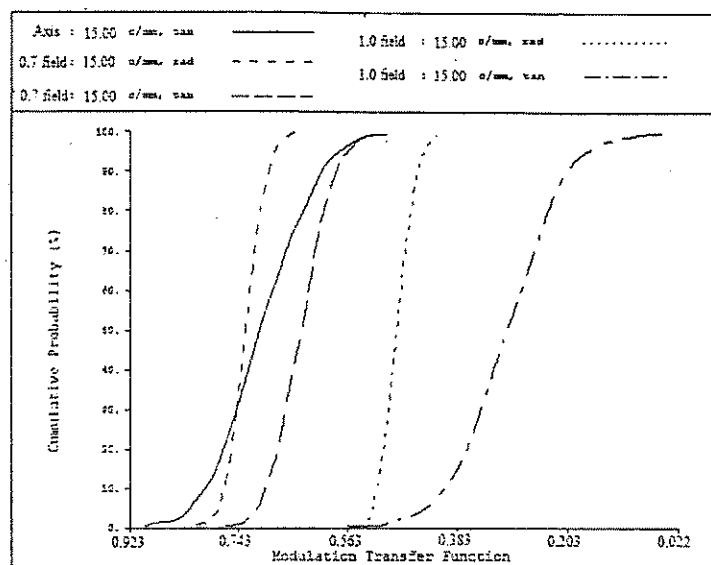
图 3-19 照相物镜分离第一个双胶合(a)、第二个双胶合(b)和第三个双胶合(c)并优化后得到的系统结构的 MTF 值因制造误差下降的累积概率曲线

3.4.3 变焦系统分析

本节对 3.3.3 节中的 $f/25$ -85mm 变焦镜头进行公差分析。该系统采用元件增减机制检测及删除了冗余元件。图 3-20 绘出了删除元件前后所得系统结构在焦距 45mm 处每毫米 15 线对的特征频率上 MTF 值的下降概率分布。从图中可以看出, 删除元件后的系统结构的轴上 MTF 数值下降速度略有增长, 而轴外视场 MTF 稳定性却略有改善, 制造误差对系统成像质量的影响没有因为删除该元件而发生很大改变。



(a)



(b)

图 3-20 变焦镜头初始结构(a)与删除元件并优化后得到的系统结构(b)
 的 MTF 值因制造误差下降的累积概率曲线

3.5 本章小结

本章提出了一个不含随机算法、可以在光学系统的优化进程中根据需要自动增减光学元件的机制。在广泛查阅有关文献基础上,选用镜头形态参数 W 和 S 做为机制的判据,通过自行设计的优化试验进一步验证了该对参数可以有效地表达系统结构的质量。理论分析和大量的设计实例表明,新的机制可以在需要时准确找出插入新增光学元件的“最佳”位置,也可以自动判别系统中可能存在的冗余元件。两个参数中,当影响系统成像质量的主要因素为畸变或慧差等奇次像差时,应选取 S 做为决定新光学元件位置的优先判据;在其它情况下, W 是较好的选择。此外,分析结果还表明,采用本文提出的增减元件机制优化得到的系统结构降低了对加工、装配误差的敏感程度,具有较好的制造性能。

本章的研究成果得到国内外同行的关注,应邀在 2002 年 Photonics Asia 国际会议上作特邀报告介绍有关工作,介绍进一步进展的论文已在 Applied Optics 上发表,其审稿专家对这项研究成果的评价为:“作者对此重要的问题提出了一个崭新的和有效的方案”。

第四章 基于神经网络的对玻璃类离散变量的优化模型

光学材料具有色散性质,同一种玻璃材料的折射率随光波波长而变化。在用光学系统对全色物体成像时,光学材料的色散造成同一物点发出的不同波长的光线在像面上的成像位置有所差异,形成色差^[2]。在光学设计中,色差的校正需要通过恰当地选择不同折射率和色散系数(阿贝数)的玻璃组合来实现。一些研究人员针对不同的光学系统进行分析,提出了各种校正色差的玻璃组合选择方式^{[107]~[109]}。世界著名的光学玻璃厂商如德国 Schott、日本 Ohara、Hoya、美国 Corning 及国内的玻璃生产厂家,一直努力地增加玻璃的种类和提高玻璃的质量,为光学设计提供更多可选择材料。

光学系统的结构参量中既有光学面曲率、轴上间隔等连续变量,又有光学玻璃这样的离散变量,是其优化设计中的一个十分棘手的问题。传统的方法将光学玻璃转换为折射率和色散系数等连续变量,在优化过程中施予适当边界条件,将其变化控制在合理的范围内。但这种方法无法保证优化结束时折射率和色散系数的取值与实际玻璃值重合,故此需要人工或计算机辅助选定玻璃后,再重新对其它的连续变量做进一步的优化,使设计过程十分繁复。

对现有优化算法的研究结果表明,无需导数信息的遗传算法和神经网络算法是实现离散变量优化的一种可行方法。本章介绍了遗传算法在光学系统玻璃材料优化中的应用,探讨了神经网络算法在玻璃类离散变量优化中的应用方法,建立了基于神经网络的玻璃类离散变量的优化模型。

4.1 遗传算法的应用

1999 年 Ono 等人对遗传算法在玻璃选择中的应用进行了研究^[110],采用实数编码方式,将所有变量编码为向量形式 $(c_1, \dots, c_{2N}, d_1, \dots, d_{2N}, n_1, \dots, n_N, v_1, \dots, v_N)$,其中 c_i 为光学面曲率, d_i 为轴上间距, n_i 是光学元件的折射率, v_i 则为相应的阿贝数, N 为系统的元件数目,各项皆归化为 $[-1000, 1000]$ 范围内的实数。每个向量对应一个光学系统结构,称为一条染色体,做为种群中的个体。若干条染色体组成一代,第一代根据给定的光学特性通过随机初始化生成一系列系统结构。在遗传算法编码过程中,所有结构参量一视同仁,以连续变量的方式进行后代繁衍;但其评价函数的计算与传统的阻尼最小二乘法不同。在阻尼最小二乘法中,光学元件的折射率 n 和阿贝数 v 在变量空间内连续变化,并以优化出来的解向量直接计算评价函数。这时解向量中的玻璃变量

取值很可能不对应实际玻璃值,优化完成后需要在玻璃库中寻找参数接近的实际玻璃来替代,由此所得的结果一般会使成像质量下降,需要在选定玻璃后,对光学面曲率、轴上间隔等连续变量再次优化。这种方法的缺点在于采用了不实际的玻璃参数进行系统评价。而在遗传优化算法中,在进行后代繁衍时没有采用评价函数导数信息,可实行直接搜索。虽然在优化过程中也允许折射率 n 和阿贝数 ν 在变量空间连续变化,但当系统被评价时,解向量中的玻璃变量取值则以最接近的实际玻璃替代,即评价函数只采用实际玻璃参数来计算,因此所得的系统始终是实际可行的。

这种方法虽然消除了优化后期的玻璃替换工作,但没有摆脱本文第一章中指出的遗传算法存在的各种缺陷。

4.2 神经网络优化模型

如前所述,在光学设计中的色差校正主要依靠选择恰当的玻璃组合来实现,即在离散约束条件下实现组合最优化的问题。如果采用全局穷尽搜索,其计算量会随系统中元件数目的增加呈指数级上升。而 Hopfield 和 Tank 所提出神经网络优化方法^{[111][112]}正是解决该类问题的经典算法。

4.2.1 神经网络算法

离散型 Hopfield 模型如图 4-1 所示,若干神经元互连形成网络,各神经元状态仅取 0 和 1 两个离散值,分别表示其抑制态和兴奋态。令神经元 i 在时刻 t 状态下为 $V_i(t)$,下一时刻状态下为 $V_i(t+1)$,则网络的状态演化满足如下方程:

$$V_i(t+1) = g \left(\sum_{j=1}^n T_{ij} V_j(t) + I_i \right), \quad i = 1, \dots, n \quad (4-1)$$

I_i 为第 i 个神经元外部输入; T_{ij} 为第 i 、 j 神经元之间的连接权。(4-1)式中的函数 $g(\bullet)$ 为第 i 个神经元的激励函数。该函数通常采用的有两种形式,一种为硬限幅函数:

$$g(u) = \begin{cases} 1 & u > 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases}; \text{另一种为 S 型函数: } g(u) = 1/(1 + \exp(-u/Q)), \quad Q \text{ 为调整函数的}$$

Sigmoid 参数。

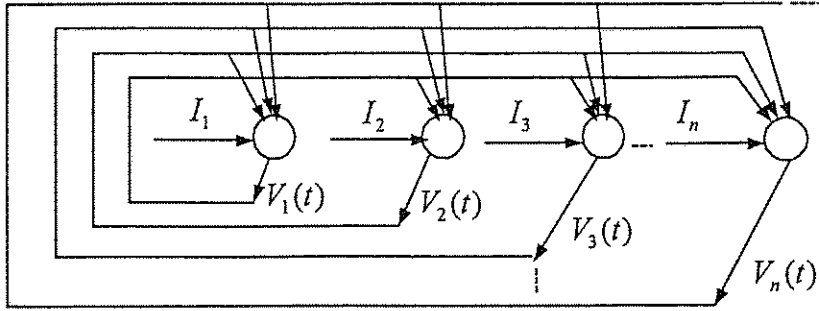


图 4-1 神经网络模型

该类离散型网络的可运行方式有两种：异步和同步。异步方式即为任一给定时刻 t ，只按照(4-1)式调整网络中一个神经元状态，其余神经元状态保持不变，各神经元状态的调整次序为随机或按某一确定规则进行。同步方式则为将网络中各个神经元状态在同一时刻 t 全部进行调整。

当网络状态 $\mathbf{V} = [V_1, V_2, \dots, V_n]^T$ 满足

$$V_{i+1} = g\left(\sum_{j=1}^n T_{ij} V_j + I_i\right) = V_i, \quad i=1, \dots, n \quad (4-2)$$

时，称 $\mathbf{V}$ 为网络的一个稳定状态；在稳定态下网络继续运行，其状态将不再改变。

为了研究神经网络的稳定性，Hopfield 引入如下能量函数：

$$E = -\frac{1}{2} \left(\sum_i \sum_j \sum_I \sum_J V_{ij} V_{IJ} T_{ijIJ} + 2 \sum_i \sum_j V_{ij} I_{ij} \right) \quad (4-3)$$

其中 T_{ijIJ} 为连接权， I_{ij} 为偏置电流， V_{ij} 为二维阵列中的神经元。并且证明了对于对称且无自反馈（即 $T_{ij} = T_{ji}, T_{ii} = 0$ ）的离散型 Hopfield 网络，在异步方式运行时，能量函数为单调非增函数。考虑到网络状态集合有限，能量函数有界，故 $E(t)$ 必将收敛于 $\mathbf{V}$ 状态空间中一个极小点，网络达到一个稳定状态。

由上述讨论可知，(4-3)式给出的能量函数表征了网络的动力学演化进程，并揭示了该演化进程与网络稳定状态之间的内在联系，能量函数的极小化过程表征了神经网络从初始状态到稳定状态的演化过程。通常，约束优化问题的求解过程实际上就是评价函数的极小化过程。评价函数达到局部极小或全局最小值时，相应的解就是约束优化问题的局部最优解或全局最优解。如果将评价函数与能量函数相联系，并通过能量函数将约束优化问题的解映射到神经网络的一个稳定状态上去，那么就可以利用神经

网络的演化过程来实现优化计算。这就是利用神经网络方法解决约束优化或组合优化问题的基本思路和策略。

以神经网络方法求解优化问题需要采用以下具体步骤：

- 1) 针对求解组合优化问题，选择合适的问题表达方式，使神经元的输出与问题的解彼此对应；
- 2) 构造能量函数，使其极小点对应于组合优化问题的最优解；
- 3) 由能量函数求得其对应的连接权值 T_{ij} 和偏置电流参数 I_i ；
- 4) 构造相应的神经网络；
- 5) 设定网络的初始状态，更新神经元以达到稳定态，并将它解释为组合优化问题的解。

上述步骤中，构造能量函数是非常关键的步骤，它决定了一个特定的问题是否能用神经网络的方法来进行求解。通常，能量函数可由反映优化目标的评价函数项和反映约束条件的若干控制函数项组成。

4.2.2 玻璃优化到神经网络的映射

从现有光学玻璃中选择合适的玻璃组合，消除色差并满足其它成像要求是我们需要解决的问题。用以下方法实现对神经网络映射：构造二维神经元阵列 $N_g \times N_e$ ，其中 N_e 为光学元件的总数， N_g 为玻璃库中的实际玻璃数。能量函数 E 的极小值即对应于光学系统约束条件下评价函数的极值，它需要满足如下要求：

- 1) 设定神经元阵列的约束，形成有效路径；
- 2) 满足光学系统的像质要求。

考虑第一个要求，在能量函数加入控制项^[113]：

$$E_1 = \frac{A}{2} \left(\sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{J=1}^{N_g} V_{ij} V_{iJ} - 2 \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} V_{ij} + N_e \right) \quad (4-4)$$

式中 A 为正常数权因子，上式假定系统中每一个元件的材料都非空气；当系统中所有元件均选取实际玻璃时，(4-4)式为零，即能量函数 $E_1 = 0$ 。

为满足第二个约束条件，在能量函数中对系统位置色差 C_L 给出控制^[113]：

$$E_2 = \frac{C}{2} \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{I=1}^{N_e} \sum_{J=1}^{N_g} C_{L_{ij}} C_{L_{IJ}} V_{ij} V_{IJ} \quad (4-5)$$

$$C_L = y^2 \phi / v$$

在该式中 C 为权因子, y 为近轴边缘光线在元件上的投射高, ϕ 为元件的光焦度, v 是玻璃材料的阿贝数。为光学元件选择不同玻璃材料时, 其光焦度将发生改变, 影响光学系统的成像特性。为满足系统的焦距要求, 我们在改变元件玻璃的同时将修改光学面的曲率, 而此操作可能会引入更大的单色像差。为避免此影响, 在能量函数中引入公式(3-2)定义的光学面的“归一化”光焦度:

$$E_3 = \frac{D}{2} \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \omega_{E_{ij}} V_{ij} \quad (4-6)$$

$$\omega_E = \left(\frac{1}{2} (w_{S1}^2 + w_{S2}^2) \right)^{1/2}$$

式中 D 为权因子, ω_E 为 w_{S1} 和 w_{S2} 的均方根, 其中 $S1$ 和 $S2$ 分别表示元件的两个光学面。

将(4-4)式、(4-5)式和(4-6)式合并, 构成总能量函数:

$$\begin{aligned} E &= E_1 + E_2 + E_3 \\ &= \frac{A}{2} \left(\sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{J=1}^{N_g} V_{ij} V_{IJ} - 2 \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} V_{ij} + N_e \right) \\ &\quad + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{I=1}^{N_e} \sum_{J=1}^{N_g} C_{L_{ij}} C_{L_{IJ}} V_{ij} V_{IJ} + \frac{D}{2} \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \omega_{E_{ij}} V_{ij} \end{aligned} \quad (4-7)$$

将该式与(4-3)式比较, 可得其连接权 T_{ijIJ} 与偏置电流 I_{ij} 为:

$$\begin{aligned} T_{ijIJ} &= -A \delta_{iI} - C \sum_{i=1}^{N_e} \sum_{j=1}^{N_g} \sum_{I=1}^{N_e} \sum_{J=1}^{N_g} C_{L_{ij}} C_{L_{IJ}} \\ I_{ij} &= A - \frac{D}{2} \omega_{E_{ij}} \end{aligned} \quad (4-8)$$

当 $I=i$ 时, $\delta_{iI}=1$; 否则 $\delta_{iI}=0$ 。

算法随机生成各个神经元初始态, 通过光线追迹来计算神经元阵列中能量函数的连接权和偏置电流的数值。在神经网络的运行中, 以异步方式按照(4-8)式调整神经元状态, 则所有与低能量值 E 对应的神经元阵列都将描述一个实际光学系统的像差平衡

态, 其评价函数较小, 有通过进一步优化达到系统像质要求的潜力。但由神经网络的运行方式可知, 其达到稳定状态的计算量与阵列容量 $N_e \times N_g$ 密切相关, 如能采用合理的小容量玻璃库, 可以有效提高运算效率。

4.2.3 小型玻璃库

为降低光学设计中玻璃选择的难度, 研究人员基于玻璃材料的光学参数、物理和化学性能、单位价格等指标, 提出了几种小型玻璃库。1978 年 Walker^[114]给出了含 61 种玻璃牌号的常用玻璃库, 如图 4-2 所示, 图中横轴为阿贝数值, 纵轴为 d 光的折射率值。该库所含玻璃的数量较大, 但均为性价比较好的玻璃。

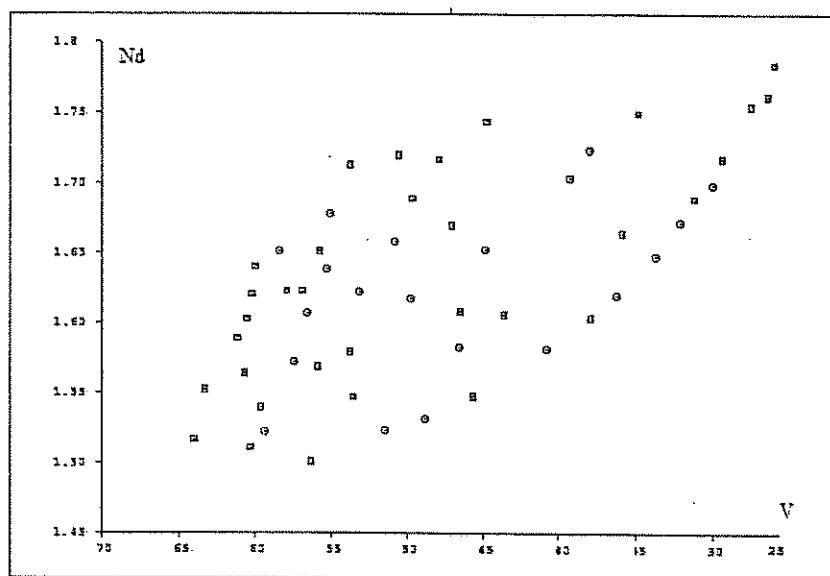


图 4-2 Walker 提出的 61 牌号玻璃库

1992 年 Zhang 和 Shannon^[115]提出了两种小型玻璃库, 分别含 10 种和 15 种玻璃, 其分布如图 4-3。

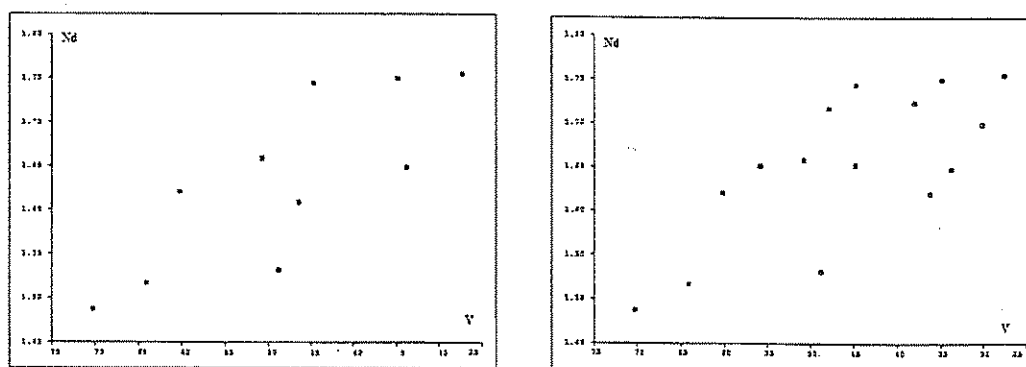
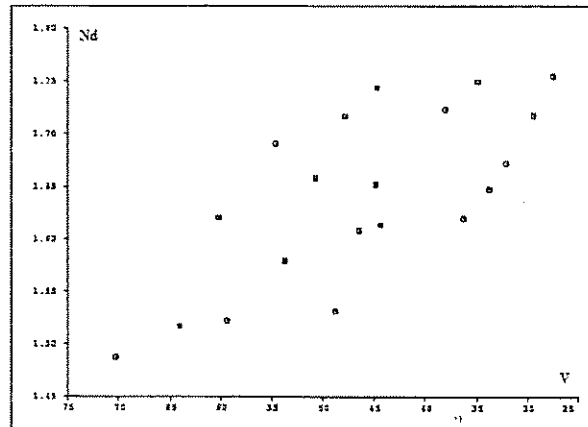
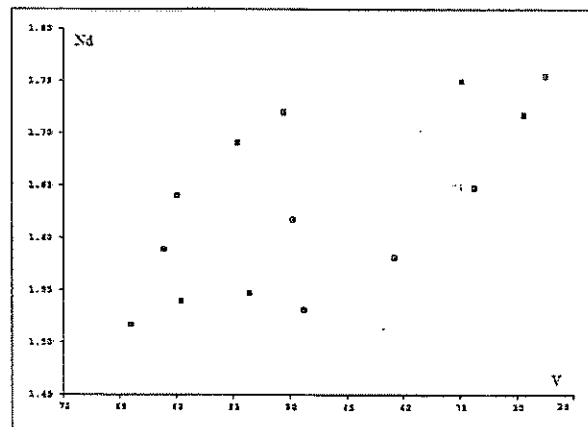


图 4-3 含 10 种玻璃(a)与 15 种玻璃 (b) 的玻璃库

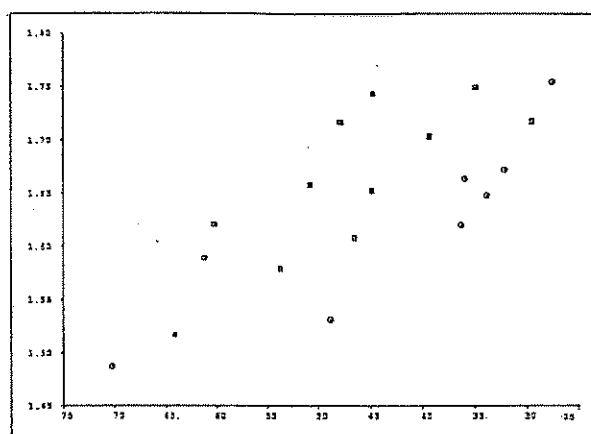
为得到更合理的玻璃分布, Tesar^[116]提出了三种玻璃库: 第一种采用 20 种 Schott 玻璃, 包含 N-LaK9 和 N-KZFS4, 以利于更好的校正色差, 如图 4-4(a)所示。图 4-4(b)所示为其提出的 15 种玻璃材料的玻璃库, 选择玻璃的原则是采用折射率和阿贝数有较大差异的材料, 远离玻璃图谱的中心区域。第三种玻璃库中材料分布与其第一种相似, 采用 18 种常用玻璃材料及四种塑料, 如图 4-4(c)所示(本章只针对玻璃材料进行分析, 图中未给出塑料材料标示)。



(a)



(b)



(c)

图 4-4 Tesar 描述的三种玻璃库: 20 种(a)、15 种(b)和 18 种(c)

Zhang 与 Shannon 所提出的玻璃库虽然较小,但在玻璃图谱上的分布不均匀,存在空白区域。Tesar 提出的几种玻璃库中,第一种的设计性能最好,但所采用玻璃为 Schott 生产,不仅光学参数与中国玻璃有差异,而且个别玻璃和中国玻璃无对应牌号。为此,我们对其做了适当的修改和添加,得到图 4-5 所示的含有 21 种材料的玻璃库,该库中的绝大多数玻璃都是我国最大的光学玻璃生产厂商——成都光明器材厂大批量生产的常用玻璃。

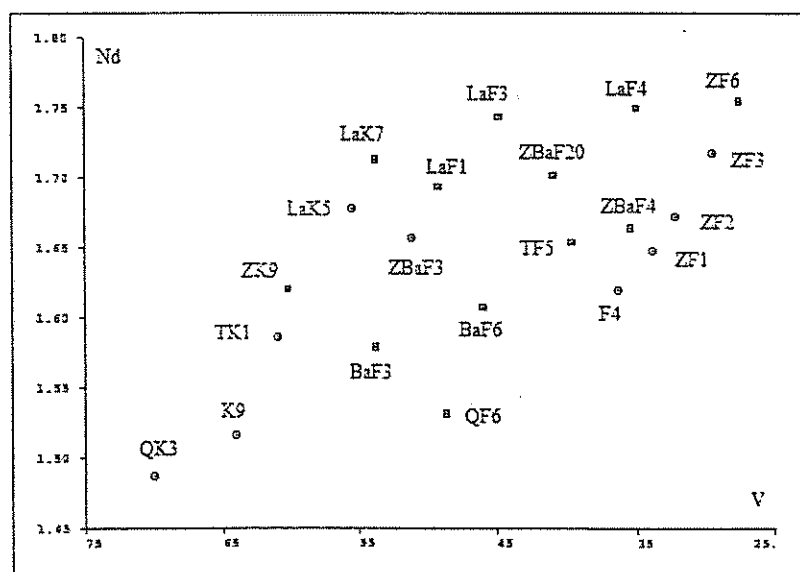


图 4-5 21 种材料中国玻璃库

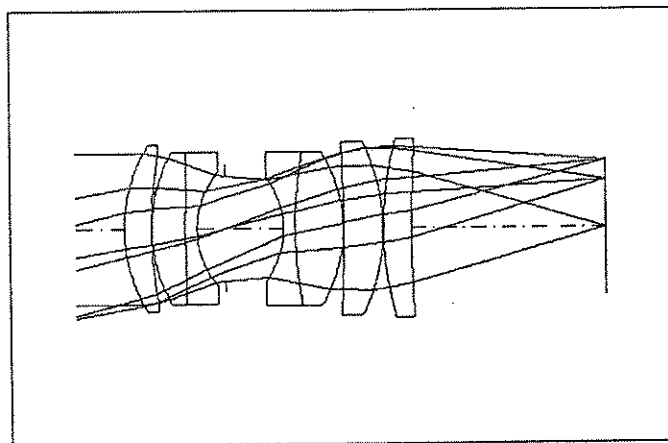
4.2.4 程序实现

玻璃库建立以后,即可建立神经网络来实现对光学系统中玻璃的优化。采用 CODE

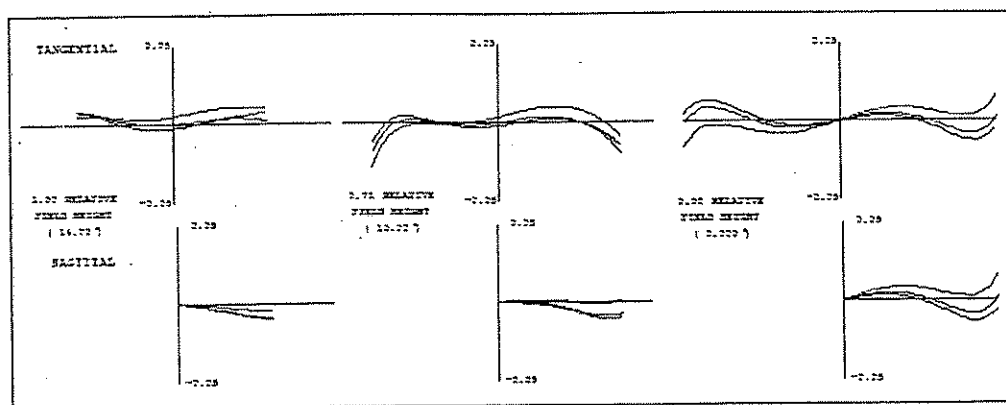
V 软件中的宏语言来实现编程^[101], 所采用的神经元阵列为 $21 \times N_e$ 。神经元初始数值随机产生, 以(4-8)式所计算得到的神经元连接权值 T_{ijU} 和偏置电流值 I_{ij} 对其进行异步更新, 如此重复直到算法收敛到稳定状态。

4.3 设计实例

用一个双高斯系统对算法进行了测试, 其 F 数为 1.8, 视场角为 $\pm 14^\circ$ 。图 4-6 绘出了初始结构系统及垂轴像差曲线。该初始系统中第一个透镜采用 ZBaF4, 第二个透镜为 LaK6, 第三个透镜为 ZF1, 第四个透镜为 ZF10, 第五、七个透镜为 LaK7, 而第六个透镜则采用了 LaK5。采用神经网络算法对该系统进行优化, 得到了几个较好的系统。图 4-7 中为优化后能量函数最小的系统, 此时其第一、二、五透镜采用 LaF3, 第三、四透镜为 ZF3, 第六个和第七个透镜则分别采用 ZK9 与 LaK7。由图 4-7(b)中的垂轴像差曲线可知, 与原系统相比, 色差与单色像差均有下降。该能量函数以控制系统位置色差和元件形态参数 ω 为目标, 未对边缘厚度等进行控制, 并且为保持光学系统焦距, 在改变光学元件材料的同时修改调整其曲率半径, 因此图 4-7(a)中系统第二片光学元件的边缘厚度很小, 需要做适当调整。

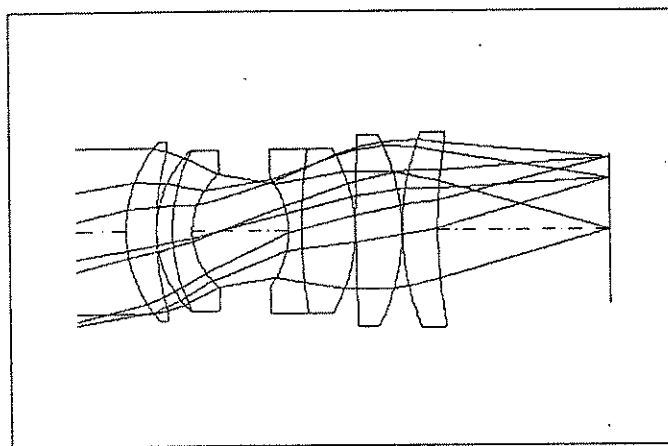


(a)

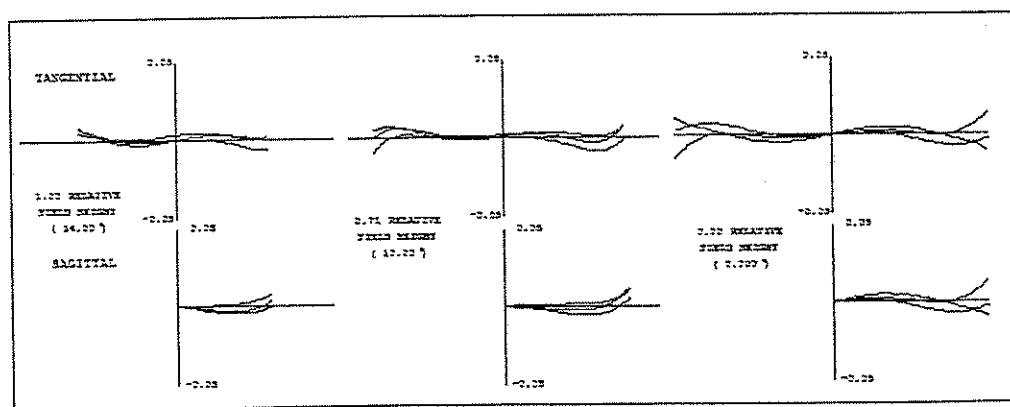


(b)

图 4-6 双高斯系统初始结构(a)和垂轴像差曲线(b)



(a)



(b)

图 4-7 玻璃优化后双高斯系统图(a)和垂轴像差曲线(b)

4.4 本章小结

为解决光学设计中玻璃类离散变量的优化问题,本章提出采用基于神经网络算法的优化模型。其能量函数极小值对应于光学系统约束条件下评价函数的极值。当采用设计者指定的玻璃品种且系统色差满足要求时,能量函数取极小值,从而实现对玻璃材料的智能化选取。为减小网络神经元总数,提高神经网络优化的收敛速度,本章对多个小型玻璃库进行了分析,并在其中一个数据库的基础上,建立了基于中国玻璃牌号的小型玻璃库。通过设计实例验证了算法的可行性。

第五章 变焦镜头初始结构专家系统

近年来,变焦镜头得到了越来越广泛的应用。它可以提供广角大画面到长焦高分辨率场景的连续变换,在民用领域可增强新闻直播与影片拍摄中的现场真实感和感染力。在军事领域,各先进国家的热像系统、观瞄系统也在从传统的定焦系统向使用更方便的变焦系统发展,预期把变焦系统作为智能化现代军队的必要装备。然而变焦镜头结构复杂,更新迅速(如单反式相机变焦物镜的变倍比已从几年前的3倍发展到现在的7倍以上),采用光学设计的传统方法建立初始结构(P-W法^[6]或从已往的设计结果中寻找相近系统)有相当大的困难。

本章介绍了变焦光学系统设计的发展历史和传统变焦光学系统的类型。在分析传统高斯光学设计方法的基础上,用优化方法实现了对包括多组元全动型复杂变焦方式在内的各种变焦镜头的高斯光学参数的自动计算。通过分析大量变焦镜头专利构造了镜头组元数据库,建立了能够自动生成变焦光学系统初始结构的专家系统,有效地提高了对这类系统设计的智能化程度。

5.1 变焦光学系统设计的发展历史

5.1.1 传统变焦光学系统的类型

传统结构的变焦光学系统由固定组、变倍组和补偿组组成。在系统工作变焦过程中,随着变倍透镜组的运动,系统焦距改变,像面位置也随之变化,为此需要由补偿组对其进行补偿,以稳定像面。根据补偿方式的不同,变焦光学系统可分为光学补偿型和机械补偿型等^[117]。

光学补偿型系统最早应用于上世纪初变焦镜头发展的初期,此种类型系统中的固定组元与运动组元通常都是相间放置,运动组元在整个变焦过程中同向等速线性运动。如1902年Allen设计的系统^[118]中,其中间组元在两个固定组元之间运动,变焦过程中的像面位置为一条抛物线,有两个稳定像面点。1935年Gramatzki提出了两种类型^[119]的光学补偿系统,分别为正透镜在两个负透镜间运动,负透镜在两个正透镜间运动,其变焦范围都很小。1937年Richter^[120]及随后的Back与Cuvillier^[117]所提出的系统中两个铰接组元绕中间固定组运动,有3个稳定像面点。光学补偿型变焦系统中的各个运动组元同时运动,降低了对机械结构的要求,但它

只能在有限几个位置实现像面补偿^{[121][122]}，不仅在整個变焦范围内存在残余像面位移，而且有变倍比小和体积庞大的问题，在很大程度上限制了其应用。

随着凸轮加工工艺的进步，机械补偿型变焦系统开始得到大范围的应用。该类系统可以使像面位移在变焦过程中得到完全补偿，一般由前固定组、变倍组、补偿组和后固定组构成：前固定组给后面的组元提供固定的像，后固定组则将前面组元的像成于最终像面；变倍组做线性或非线性运动，担负系统变倍作用；补偿组则一般做曲线运动。

按照运动组元数量和系统中的光焦度排列方式，可以将机械补偿型变焦系统分为以下五类^[117]。

- 1) 图 5-1 所示为该类型系统发展早期所提出的一种变焦镜头形式，现在多用于望远系统，其组元的光焦度排列方式为正-负-正，系统中起变倍作用的为负透镜组，补偿部分由正透镜组完成，其运动轨迹由虚线示意。

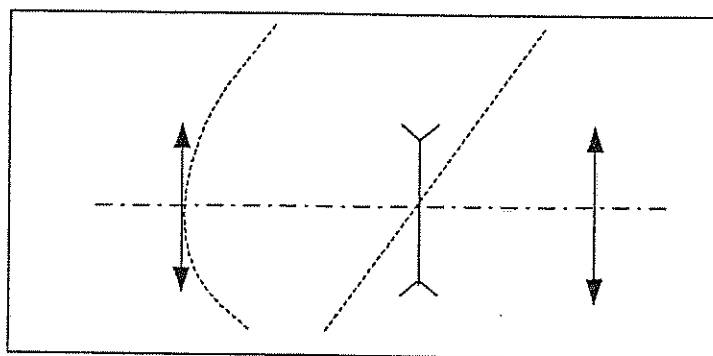


图 5-1 正组补偿变焦系统

- 2) 图 5-2 中两种变焦形式由法国 Angenieux1954 年提出^[123]，其中图(a)所示的组元光焦度排列方式与图 5-1 相同，但其像面补偿由最后一个组元实现，而图 5-2(b)中的第二种形式则加入了负后固定组，补偿组运动为线性。

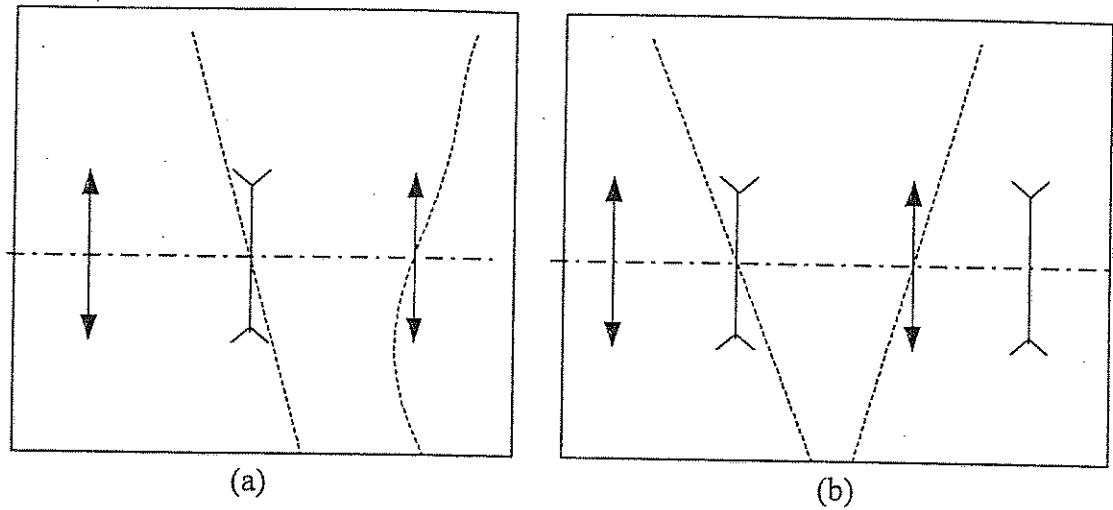
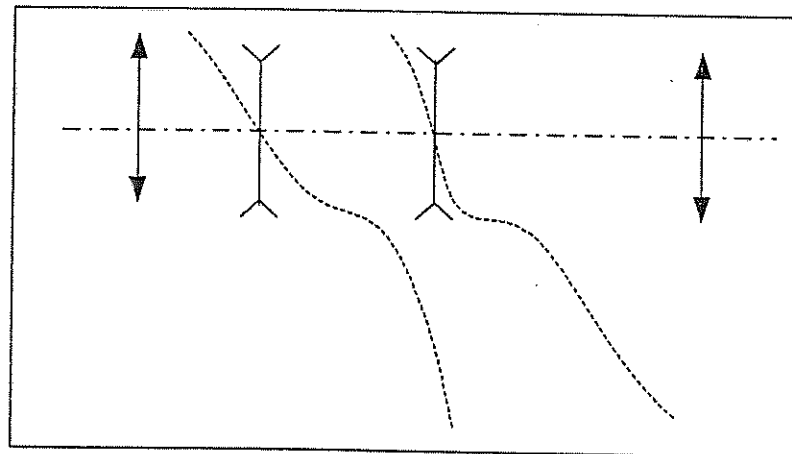


图 5-2 Angenieux 提出的两种机械补偿变焦形式

3) 1950 年 Hopkins 提出了图 5-3(a)所示的变焦系统, 该系统中组元按正-负-负-正方式排列^[117], 第二、三组元在整个变焦过程中相互配合, 以实现变倍和补偿, 其运动轨迹接近 S 形。国内有关单位在一些变焦镜头设计中所采用的组元排列方式与该系统类似, 但组元运动轨迹不同, 见图 5-3(b)。



(a)

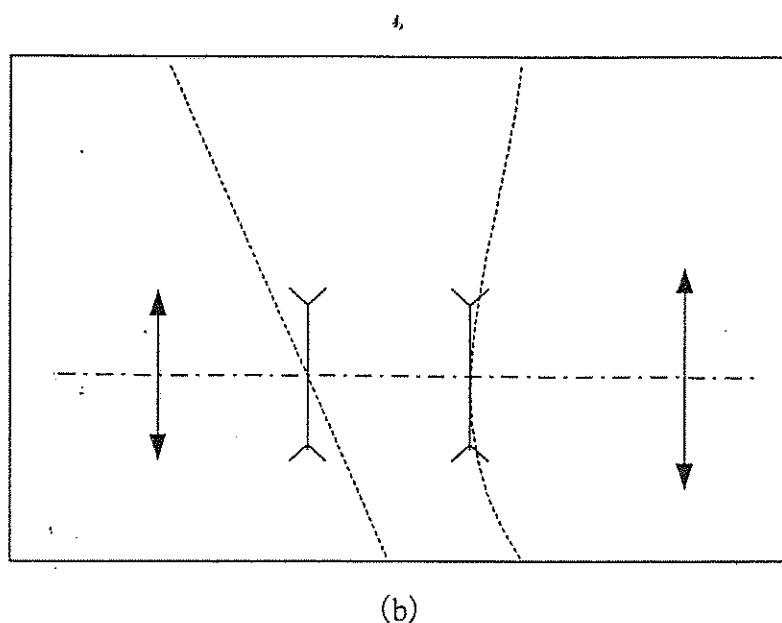


图 5-3 正-负-负-正排列的机械补偿变焦系统

4) 随着机械加工能力的提高,在变焦光学系统中开始采用更多数量的组元,以提高变倍比和改善系统的光学性能;与此同时,为减少凸轮曲线的数目,将几个运动组元铰接,即所谓光学机械混合补偿变焦系统。图 5-4 所示系统是英国人 Cook 在 1971 年提出的 10 倍变倍比镜头^[117],其第三个和第五个组元铰接,第四个组元独立运动,前组为负透镜组以实现调焦,当物体的距离发生变化时,组元的孔径变化量小。

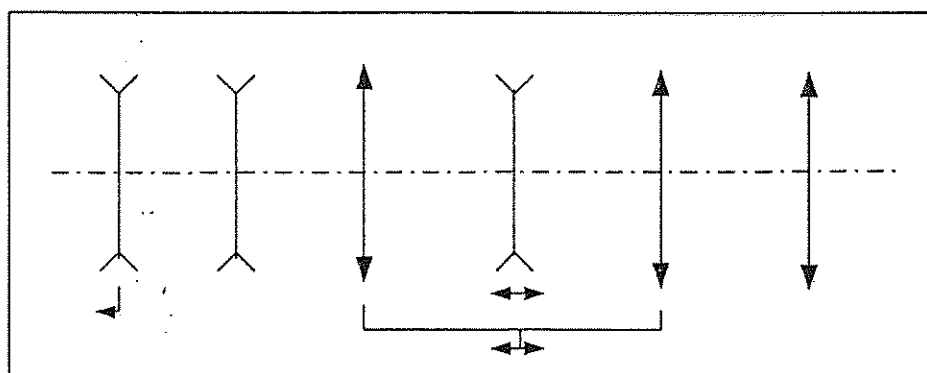


图 5-4 可调焦的光学机械混合补偿变焦系统

5) Yamaji 在 1967 年提出了另一种形式的光学机械混合补偿型变焦系统^[117],该系统与 Cook 提出的类型相似,但运动组元的结合方式不同:此时两个负组元铰接绕中间正组元运动,而中间正组元独立运动。

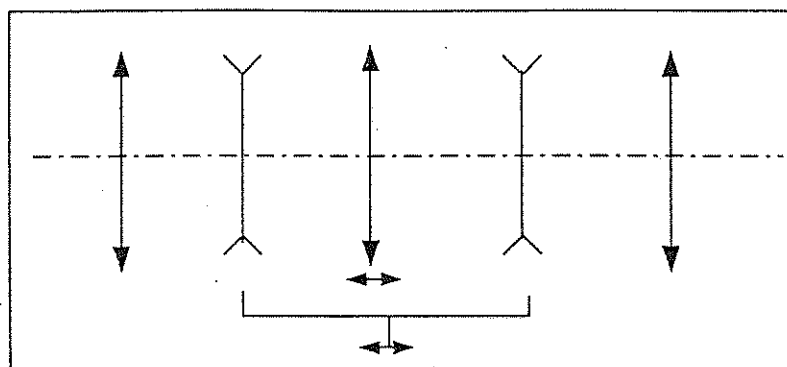


图 5-5 Yamaji 提出的光学机械混合补偿变焦系统

5.1.2 变焦光学系统组元运动曲线计算方法

设计光学补偿型或机械补偿型变焦光学系统常采用的设计步骤为：选定系统中各个组元的运动方式，在此基础上建立像面位移解析方程组，然后根据已给定组元之间的运动关系对方程组求解。常采用的解方程方法有高斯括号法、连分数法和微分方程法。

(1) 光学补偿型变焦系统中运动组元曲线的计算

Bergstein 在 1958 年以变高斯括号法 (Modified Gaussian brackets) 对光学补偿型变焦系统进行高斯光学分析^[124]。其推导方向为从像面向物面，而组元序号按此方向递增，因此当物在无穷远时，第 v 组元的像面位置可以用连分数表示如下：

$$X'_v = \frac{f_v^2}{D_{v,v+1} - \frac{f_{v+1}^2}{D_{v+1,v+2} - \cdots - \frac{f_{n-1}^2}{D_{n-1,n}}}} \quad (5-1)$$

n 为组元总数， $D_{v,v+1}$ 为从 v 到 $v+1$ 组元的焦点之间的距离， f_v 为组元 v 焦距； X_v 、 X'_v 分别表示组元 v 的物点到物方焦点和像点到像方焦点的距离，由于是从物面向像面推导，表达方式与传统方法略有不同： $X'_v = -(f_v^2 / X_v)$ ； $X_{v-1} = -(D_{v,v-1} - X'_v)$ 。

为简化 (5-1) 式中的分母，引入变高斯括号法，即以 $\psi_k(n, m)$ 表示 $f_{n-1}^2, f_{n-2}^2, \dots, f_{m+2}^2, f_{m+1}^2$ 和 $(-1)^n D_{n-1,n}^2, (-1)^{n-1} D_{n-2,n-1}^2, \dots, (-1)^{m+1} D_{m,m+1}^2$ 等参数在分母中的乘积交叉项， k 为交叉项次数，这样对于 4 个组元的变焦光学系统可表述为：

$$\psi_1(4,3) = D_{4,3}, \quad \psi_2(4,3) = 0;$$

$$\psi_1(4,2) = D_{4,3} - D_{3,2}, \quad \psi_2(4,2) = -D_{4,3}D_{3,2} - f_3^2, \quad \psi_3(4,2) = 0;$$

$$\psi_1(4,1) = D_{4,3} - D_{3,2} + D_{2,1},$$

$$\psi_2(4,1) = -D_{4,3}D_{3,2} + D_{4,3}D_{2,1} - D_{3,2}D_{2,1} + f_3^2 + f_2^2,$$

$$\psi_3(4,1) = -D_{4,3}D_{3,2}D_{2,1} + f_3^2D_{2,1} + f_2^2D_{4,3}, \quad \psi_4(4,1) = 0$$

因而系统像面位置与系统焦距 f 可以(5-2)式表达:

$$\begin{aligned} X'_1 &= f_1^2 [\psi_{n-2}(n,2) / \psi_{n-1}(n,1)] \\ f &= \left[\prod_{v=1}^n (-1)^{v-1} f_v \right] \frac{1}{\psi_{n-1}(n,1)} \end{aligned} \quad (5-2)$$

对于光学补偿型的变焦系统,运动组元与固定组元相间排列,所有运动组元的运动方向相同、速度相等,因此可以引入组元位移值 x ,进一步将像面位移表达式(5-2)转换为:

$$X'_1 = f_1^2 \left[\frac{\psi_{n-2}(n,2)}{\psi_{n-1}(n,1)} \right] = f_1^2 \frac{x^{n-2} + \psi_1(n,2)x^{n-3} + \cdots + \psi_{n-3}(n,2)x + \psi_{n-2}(n,2)}{x^{n-1} + \psi_1(n,1)x^{n-2} + \cdots + \psi_{n-2}(n,1)x + \psi_{n-1}(n,1)} \quad (5-3)$$

对该方程式求解,即可得到光学补偿变焦系统中组元运动方式。

(2) 机械补偿型变焦系统的变焦过程分析

随着加工工艺改善,机械补偿型变焦系统的应用变为可能,为此众多光学设计者对该类系统运动组元位移量计算方法及解区域进行了深入探讨。Tanaka 指出^[125]:机械补偿变焦系统必须在倍率变化的同时保持物像之距不变,因此至少有两个元件沿光轴运动实现变焦;并采用高斯括号法建立了机械补偿型变焦系统的变焦方程。

假设变焦光学系统有 n ($n \geq 4$) 组元,变焦过程中第一个与最后一个组元固定,其它为运动组元。 $d'_{i,0}$ 表示起始状态时第 i 个到第 $i+1$ 个组元的间距, ϕ_i 表示 i 组元光焦度, x_i 为 i 组元位移量,以高斯括号法表示像面位移为零时的表达式为:

$$Z(x) = [-d'_0, \phi_1, -d'_1, \phi_2, \cdots, \phi_n, -d'_n] = 0 \quad (5-4)$$

$$d'_1 = d'_{1,0} + x_2, \quad d'_{n-1} = d'_{n-1,0} + x_{n-1}, \quad d'_i = d'_{i,0} - x_i + x_{i+1}, \quad i = \{2, 3, \dots, (n-2)\}$$

其中 d'_0 与 d'_n 分别表示系统物距与后截距。

消去(5-4)式里的高斯括号并将 x_i 以降幂排列,表达为 x_i 的显式方程 (5-5), 式

中 U 、 V 和 W 为各组元光焦度和组元间隔所表达的参数。由该方程可知, 可以求得两个解来满足像面位移为零的条件。

$$Ux_i^2 + Vx_i + W = 0, \quad (5-5)$$

为了进一步了解变焦光学系统的组元运动特性, 需要求取像面位移方程 Z 关于 x_i 和 x_j ($1 < i < j < n$) 的偏导数, 并以组元的倍率及光焦度等来表示:

$$\begin{aligned} \partial Z / \partial x_i &= (\beta_{i+1,n} / \beta_{1,i-1}) \{ (1 - \beta_i^2) / \beta_i \} \\ \partial^2 Z / \partial x_i^2 &= -2(\beta_{i+1,n} / \beta_{1,i-1}) \phi_i \\ \partial^2 Z / (\partial x_i \partial x_j) &= \{ (1 - \beta_i^2) / \beta_i \} \{ (1 - \beta_j^2) / \beta_j \}^{i+1} C_{j-1} \\ &\quad + \{ (1 - \beta_i^2) / \beta_i \} \phi_j \beta_{i+1,j-1} - \{ (1 - \beta_j^2) / \beta_j \} \phi_i / \beta_{i+1,j-1} \end{aligned} \quad (5-6)$$

由(5-6)式可知, 所有运动组元倍率为单位量时, 变焦方程组存在奇异点:

$$|\beta_i| = 1, \quad i = 2, 3, \dots, (n-1) \quad (5-7)$$

此时

$$\partial Z / \partial x_i = 0 \quad (5-8)$$

当变焦方程组海赛矩阵非零时, 该奇异点为非退化, (5-5)式在该点有解的必要条件为海赛矩阵非正, 即:

$$\begin{aligned} H &= [\partial^2 Z / (\partial x_i \partial x_j)] \neq 0 \\ H &= [\partial^2 Z / (\partial x_i \partial x_j)] < 0; \quad i, j = 2, 3, \dots, (n-1) \end{aligned} \quad (5-9)$$

因此如果满足(5-9)式的条件, 像面位移方程式(5-5)的两条解曲线可在该点相切, 以实现平滑换根, 进而扩大变焦光学系统的变倍比; 若该式中条件无法满足, 该点则为“孤立点”, 无法在此处连续变焦。

1977 年陶纯堪采用微分方程法讨论了机械补偿型变焦系统的运动组元位移量的计算方法和解的存在区域^{[81][126]}。该方法以倍率为参数对组元运动进行分析, 在第一个组元与最后一个组元固定的前提条件下, 得到了 n 组元系统的变焦方程:

$$\sum \frac{1 - \beta_i^2}{\beta_i^2} f_i^2 d\beta_i = 0, \quad i = 2, \dots, (n-1) \quad (5-10)$$

f_i , β_i 为系统各组元焦距和倍率。

(5-10)式所示的变焦方程与 Tanaka 所采用的高斯括号法虽然形式不同, 但通常变倍组每处于一个位置, 补偿组也有两个解与之对应, 当部分或所有运动组元的

倍率为单位量时,可以令运动组元的两条解曲线相切。如适当选择参数,令两条曲线相切,并分别取其有较大变倍比的部分,则可增大变焦光学系统的变倍比。1977年北京608厂所介绍的双组连动变焦系统设计^[127]及1978年长春光机所给出的变焦光学系统像面稳定条件^[128]对凸轮曲线取值方式及解区域也进行了探讨。

5.2 多组元全动型变焦系统初始结构自动生成的专家系统

在变焦光学系统设计的发展过程中,光学设计者一直致力于探索新的变焦方程,对不同类型的变焦光学系统组元运动的解区域进行分析,并采用这些变焦方程设计了大量光学系统,以期实现更大的变倍比和获得更好的光学性能。但现有的变焦方程建立在指定各个组元作用——即固定组、变倍组和补偿组等——的基础上;求解过程中奇异点的存在及选择方式又会在很大程度上影响系统的光学性能,需要光学设计者对解区域进行仔细分析;而在系统加工过程中的加工误差又可能使这些奇异点变成“孤立点”,令位移曲线产生隐藏的间断。随着人们对高性能、大变倍比、小型化的复杂变焦光学系统的要求,随着加工技术的进步和加工精度的提高,多组元全动型变焦光学系统已经成为未来的发展趋势^[129]。多组元全动型变焦光学系统的设计难度随着运动组元数目的增加而提高,现有的求解运动组元凸轮曲线的方法难以解决该类变焦系统的设计。为此,王琦等人提出了实现此种光学系统高斯参数设计的方法^[130],在已知所有组元焦距(包括变倍组元)的情况下,对补偿组元的位移量进行优化。但这种方法的组元焦距需根据经验来选取,且如果解出的组元的 F 数很小,所得结果就难以实现。

为解决这一问题,本文提出采用拉格朗日乘子法来实现对任意变焦方式的变焦系统的高斯光学参数的自动计算。这时,在系统中不再区分变焦组元和补偿组元,所有运动组元的位移量和焦距都做为优化变量,设计软件根据优化确定的高斯光学参数和各个组元视场、孔径的要求,从数据库中自动选取合适的组元结构,从而构成了可以自动生成变焦镜头初始结构的专家系统。

5.2.1 高斯参数的优化方法^{[130]~[132]}

设变焦系统有 n 个运动组元,其变倍比为 z_r ,系统的最小焦距为 $f_{\min}$ 。将变倍范围均匀地分为 m 等份,各组元焦距分别为 $f_1, f_2, \dots, f_n$ 。它们在每个焦距位置相

对于组元初始位置的移动距离为 $x_{ij}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m)$, 其符号规定如下: 若组元相对于初始位置自左向右运动, 则 x_{ij} 符号为正; 反之为负。为实现变焦, 运动组元的运动曲线和高斯参数应满足如下条件:

1) 系统焦距按照给定规律变化 (一般为线性):

$$\begin{aligned} f(x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}; f_1, f_2, \dots, f_n) &= f_{\min} + (j-1)(f_{\max} - f_{\min})/(m-1), \\ f_{\max} &= f_{\min} \times z_r; \quad j = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (5-11)$$

2) 为避免变焦过程中相邻运动组元碰撞, 对其空气间隔加以控制:

$$d_{ij}(x_{ij}, x_{(i+1)j}) > D_i, \quad D_i > 0 \quad (5-12)$$

3) 对每个组元的 F 数进行控制, 令其大于下限 Λ_i , 以便在组元数据库中找到满足条件的结构:

$$\frac{f_i}{2h_i} > \Lambda_i \quad (5-13)$$

h_i 为组元在变焦过程中近轴边缘光线在组元上的投射高。表 5-1 中为本文所建立的组元数据库中组元在不同视场角时可满足的 F 数; 根据对所构建组元数据库中组元分析, Λ_i 的缺省值设为 1.50。

表 5-1 组元数据库中不同视场角可满足的 F 数

Field of view (Deg.)	From 0 to 5	From 5 to 10	From 10 to 15	From 15 to 20	From 20 to 25	From 25 to 30
Minimum F -number	0.6	0.85	0.825	0.7	0.57	0.65
Field of view (Deg.)	From 30 to 35	From 35 to 40	From 40 to 45	From 45 to 50	From 50 to 55	From 55 to 60
Minimum F -number	0.64	0.58	0.63	0.72	1.3	1.83

同时为了获得光滑的变焦凸轮曲线, 避免其运动艰涩, 高斯参数优化的评价函数定义为在每个变焦位置上各个组元运动曲线曲率的平方和。

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mu_{ij}^2 \quad (5-14)$$

其中

$$\mu_{ij} = \frac{x_{ij}''(f_j)}{[1 + x_{ij}'^2(f_j)]^{3/2}} \quad (5-15)$$

$x_{ij}'(f_j)$ 与 $x_{ij}''(f_j)$ 分别为 $x_{ij}(f_j)$ 的一次和二次导数。

将变焦范围 $[f_{\min}, f_{\max}]$ 均匀细分为 m 等份, 步长 $\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})/(m-1)$ 。当步长

增量很小时, 可以将(5-15)式中曲率表达式的微商用差商替代, 从而得到:

$$x'_{ij}(f_j) = (x_{ij} - x_{i(j-1)}) / \Delta f, \quad x''_{ij}(f_j) = (x_{ij} - x_{i(j-2)}) / \Delta f^2$$

和

$$\mu_{ij} = \frac{x_{ij} + x_{i(j-2)}}{\Delta f^2} / [1 + (\frac{x_{ij} - x_{i(j-1)}}{\Delta f})^2]^{3/2}$$

则高斯参数优化的评价函数可以转化为:

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\frac{x_{ij} + x_{i(j-2)}}{\Delta f^2})^2 / [1 + (\frac{x_{ij} - x_{i(j-1)}}{\Delta f})^2]^3 \quad (5-16)$$

对其应用拉格朗日乘子法, 引入乘子向量 λ , 将(5-16)式中的高斯参数优化问题表达为等式约束极值问题(5-11)和(5-16)的最小二乘问题解, 而对不等式约束(5-12)和(5-13), 则当约束被破坏时, 以罚函数的形式加入评价函数, 得到下面正规方程组:

$$\begin{aligned} \mathbf{M} \cdot \Delta \mathbf{X} - \mathbf{B}^T \lambda &= \min \\ \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{X} &= \mathbf{R} \end{aligned} \quad (5-17)$$

等式约束(5-11)以矩阵 $\mathbf{B} = [\partial f_j(x) / \partial x_i]$ 表示; $\Delta \mathbf{X}$ 为优化变量向量, $\mathbf{R}$ 为 f 与理想值之间的差值向量; $\mathbf{M} = [\partial^2 E(x) / \partial x_i \partial x_j]$ 为评价函数的海赛矩阵。优化最终将给出每个组元的焦距 f_i 和各组元在不同系统焦距时相对于其初始位置的位移量 x_{ij} 。

5.2.2 专家系统 — 组元结构自动生成

现代光学设计中生成系统初始结构的传统方法包括 P-W 法和以解析方式讨论实际组元的结构形式^{[133][134]}。为此, 设计者需根据系统的高斯参数及像差值建立求解方程, 并针对其解区域进行分析, 以寻找适合的实际结构形式, 这需要设计人员具有丰富的设计经验和像差理论知识。

从上文对一个世纪以来的各种类型的变焦光学系统分析可知, 众多设计者为满足不同的成像要求, 进行了大量的变焦光学系统设计^{[135]~[138]}, 可见光范围的设计专利就有数千个, 这些系统中的各个组元均在不同条件下进行了像差校正, 可在一定的视场角和通光孔径范围内进行光线追迹。为充分利用前人的设计成果, 本文对查到的近 2000 个变焦镜头专利进行了逐个分析, 分解出了系统中的各个组元, 生成了独立的组元系统文件, 并在此基础上建立了透镜组元数据库 (7124 个文件), 数据库中每个组元的属性包括其在原始专利系统中的 F 数范围 $[F\#_{g,\max}, F\#_{g,\min}]$ 、视

场角范围 $[\theta_{g,\max}, \theta_{g,\min}]$ 、倍率范围 $[M_{g,\max}, M_{g,\min}]$ (下标 g 表示其为数据库中的组元特性)、组元的元件个数、后焦点距和前焦点距等性能参数, 以方便专家系统从数据库中自动选取合适的组元结构。在建立数据库时, 为统一参数意义, 所有分析都是在专利系统在广角位置时的焦距为 100mm 时进行; 而分解出的各个组元也归一化为 100mm (或-100mm)。

当找到满足设计变倍比和光滑凸轮曲线要求的变焦光学系统高斯结构后, 专家系统就会从数据库中为每个组元自动选择满足条件的实际透镜组, 选择标准包括该组元在变焦光学系统中的 F 数范围 $[F\#_{i,\max}, F\#_{i,\min}]$, 视场角范围 $[\theta_{i,\max}, \theta_{i,\min}]$ 和角放大率范围 $[M_{i,\max}, M_{i,\min}]$ (下标 i 表明组元在变焦系统中的序号)。系统采用了下列不等式:

$$\begin{aligned} F\#_{i,\max} * \delta_1 &< F\#_{g,\max} < F\#_{i,\max}, \quad F\#_{i,\min} * \delta_1 < F\#_{g,\min} < F\#_{i,\min} \\ \theta_{i,\max} / \delta_2 &> \theta_{g,\max} > \theta_{i,\max}, \quad \theta_{i,\min} / \delta_2 > \theta_{g,\min} > \theta_{i,\min} \\ |M_{i,\max}| / \delta_3 &> |M_{g,\max}| > |M_{i,\max}| * \delta_4, \quad |M_{i,\min}| / \delta_3 > |M_{g,\min}| > |M_{i,\min}| * \delta_4 \end{aligned} \quad (5-18)$$

其中因子 $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 和 δ_4 均小于 1, 以控制所选择组元的范围。一般而言, 较大视场角和较小 F 数的组元结构会相对复杂, 给出视场角上限和限制 F 数最小值可在一定程度上保证得到结构简单而满足光学特性的变焦系统。 δ_1 和 δ_2 的缺省值为 0.9, δ_3 和 δ_4 的缺省值为 0.8。从面向物方的组元开始, 一个个地进行顺序选择装配, 直到像面前的最后一个组元也在数据库中找到合适的结构。在此过程中, 对相邻组元在系统中使用的放大倍率范围内的像距和物距进行分析, 以避免在变焦过程中发生碰撞。

5.2.3 变焦系统初始结构专家系统的程序实现

上述专家系统已用 CODE V 的宏语言编程实现^[101]。在应用本专家系统时, 使用者可根据需要输入变焦光学系统的最小焦距、变倍比、最大视场角、 F 数范围及相应的边界条件。程序根据用户要求, 首先计算系统的高斯光学参数, 并根据近轴光线在不同组元上的投射高自动优选系统光阑位置。完成系统的高斯光学设计后, 从镜头组元数据库中为每个组元自动选择满足条件的实际透镜组, 对完成组元装配的每个系统初始结构进行评价, 并输出在各个焦距位置上均能顺利追迹光线的结构。图 5-6 给出了应用本专家系统生成变焦系统初始结构的流程图, 程序同时还采

用了个外循环，逐个构造不同形式的可能解，以方便选择。当其无法找到更多的结果，或得到的系统结构总数已满足缺省上限时，程序终止。

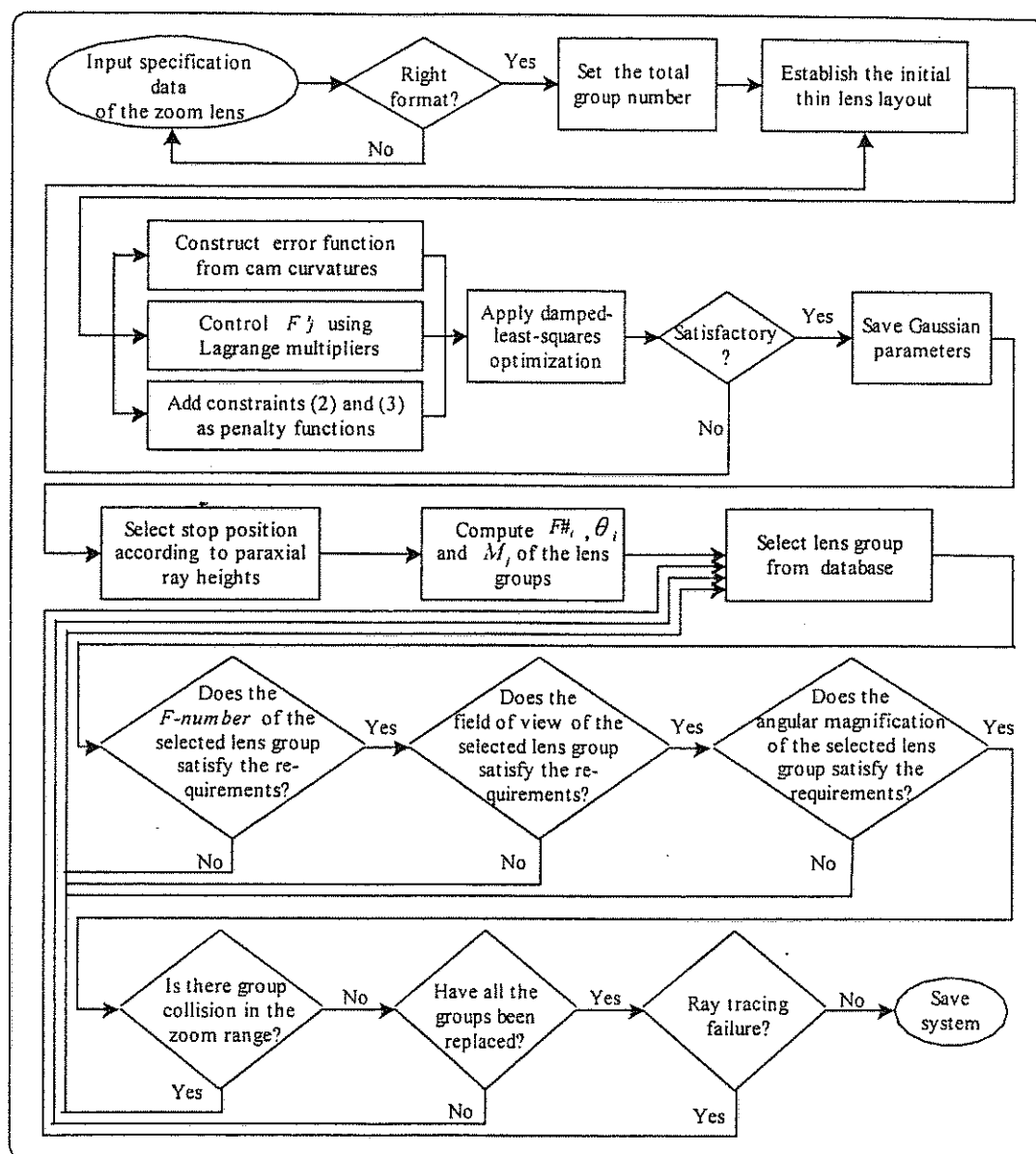


图 5-6 获得一个变焦光学系统初始结构流程图

5.3 设计实例

5.3.1 变焦照相镜头

首先采用上述专家系统设计一个 $f/24-84\text{mm} / F3.5-4.5$ 的 3.5 倍变焦照相镜头，广角位置的最大视场角 $\pm 39.8^\circ$ ，用 4 个运动组元实现。专家系统自动生成了一系列

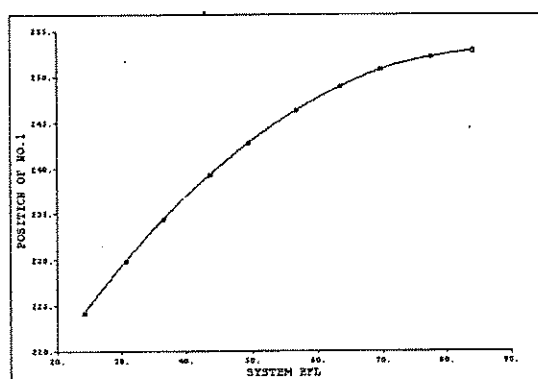
的初始结构, 本节对其中一个进行了分析。

表 5-2 给出了高斯参数优化完成后, 每个独立组元的焦距及 F 数要求。各运动组元的凸轮曲线见图 5-7, 图 5-8 给出了专家系统根据每一个组元各自的高斯参数为其从数据库中自动选取的初始结构。由于用实际透镜组元替代高斯光学设计中的理想透镜时会改变系统焦距, 要得到满足光学性能要求的变焦镜头必须对专家系统提供的初始结构进行进一步优化, 优化后系统垂轴像差曲线在图 5-10 中给出。

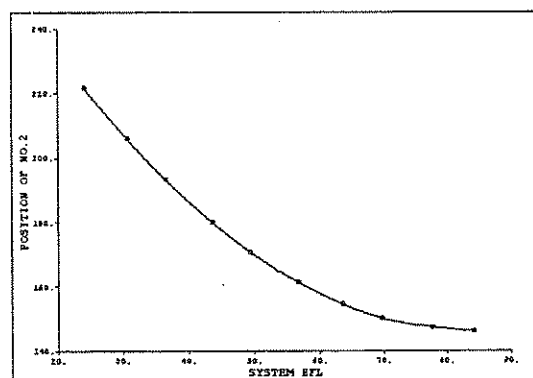
试验表明本专家系统可以根据变焦系统的光学特性要求, 自动生成较好的初始结构, 本例中找到的系统共采用了 10 片光学元件, 4 个运动组元。

表 5-2 高斯参数优化确定的各组元焦距和对应 F 数

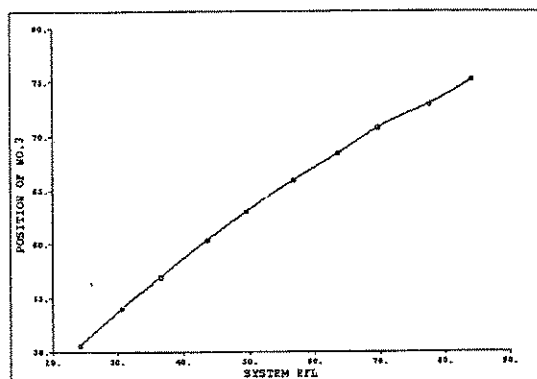
Lens group number i	1	2	3	4
Focal length of moving lens group f_i	272.7364	-36.5308	57.9591	-1895.6053
Smallest F -number required	14.62	3.88	2.59	135.4



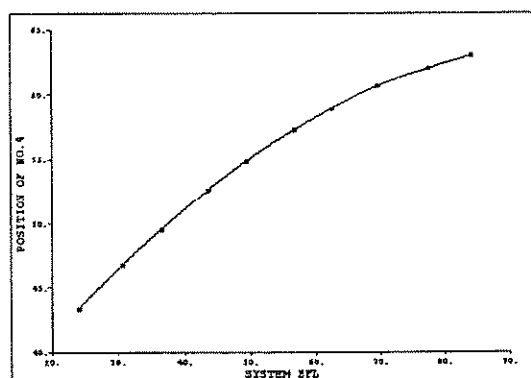
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5-7 各组元相对于像面的凸轮运动曲线

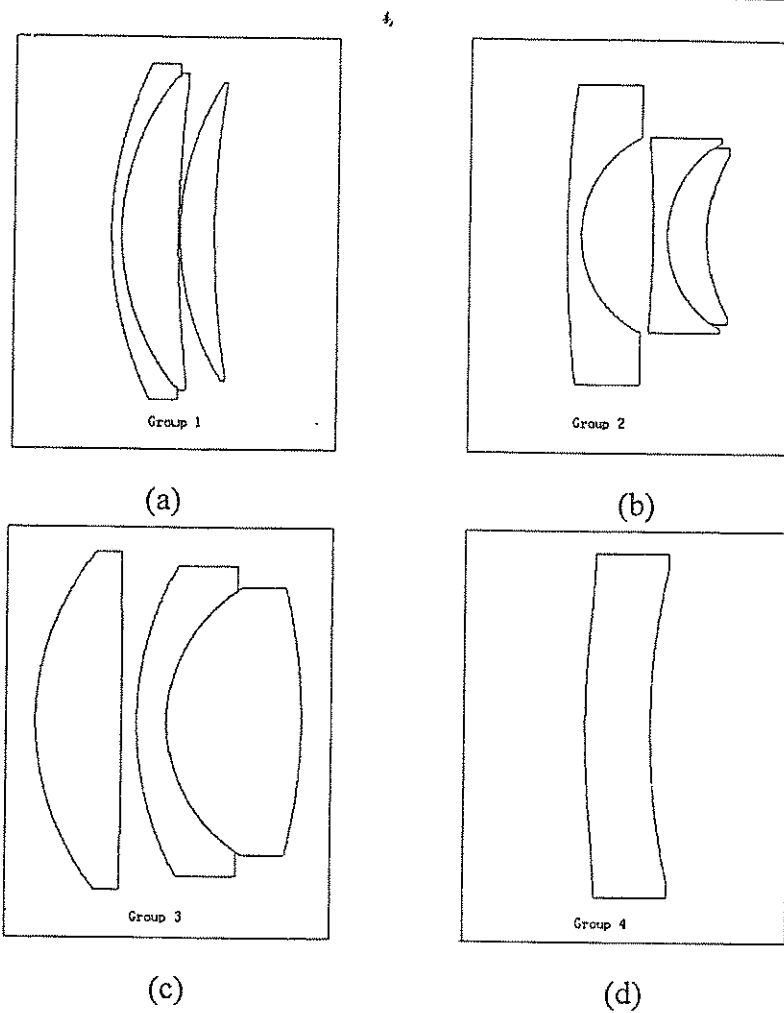


图 5-8 自动生成的初始系统的各个组元结构

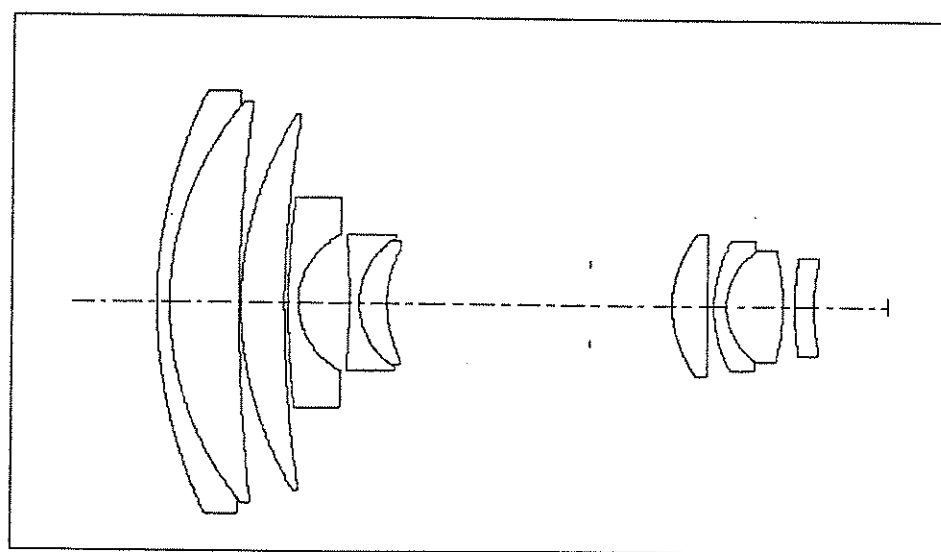


图 5-9 自动生成的初始系统结构图

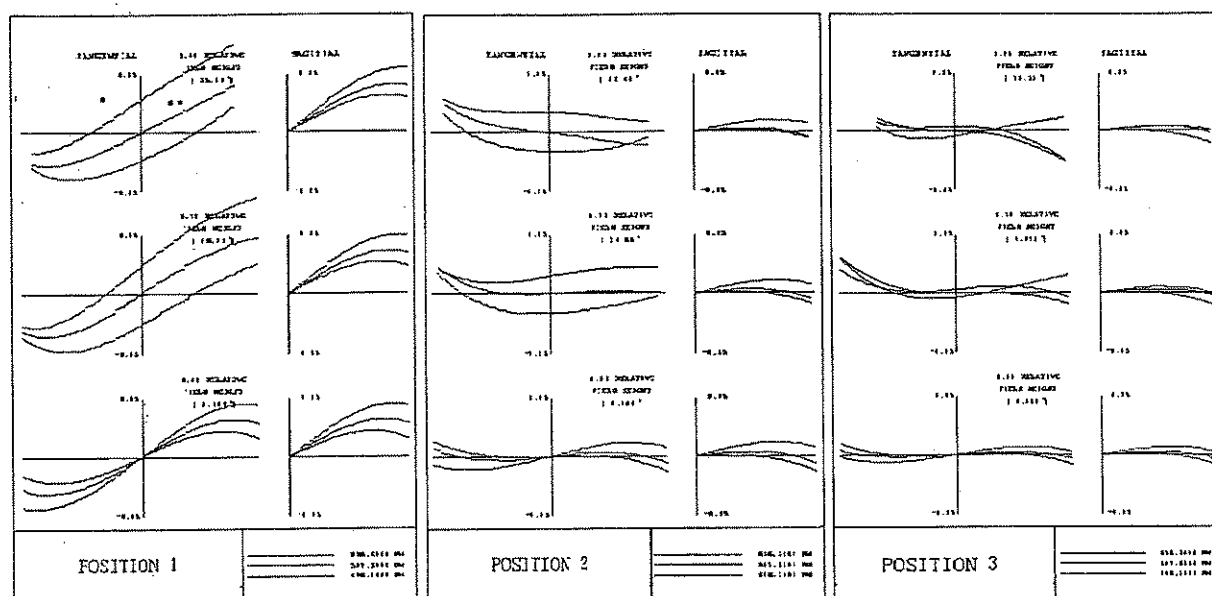
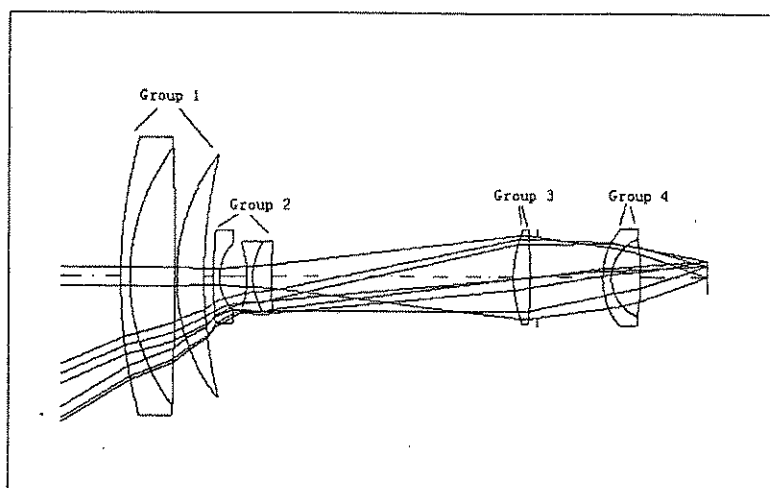


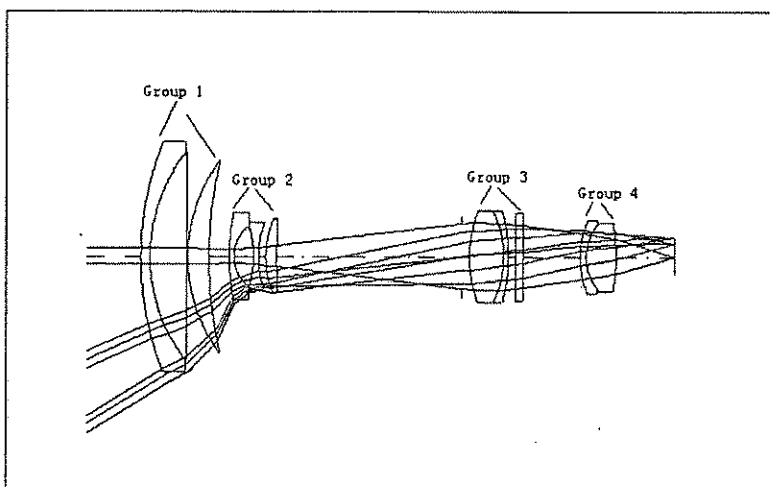
图 5-10 进一步优化后三个变焦位置的垂轴像差曲线

5.3.2 大变倍比变焦镜头

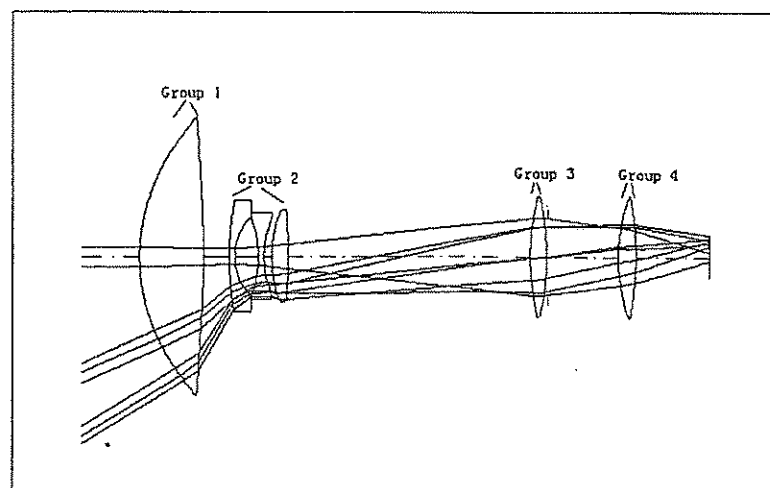
第二个设计实例为用于摄像机的 14 倍变倍比变焦镜头，其焦距范围为 10-140mm， F 数范围 1.8-2.6，广角位置的最大视场角 $\pm 32^\circ$ 。使用本专家系统可以找到多种不同的结构形式。图 5-11 给出了满足上述光学性能要求的 4 种结构，画出的是该变焦镜头在广角位置时的状态。其中，图(a)和(b)中的两个结构采用了相同的第 1 组元和第 4 组元，而图(b)和(c)的系统中的第 2 组元结构相同；在图(a)和(c)中的系统光阑位于第 3 组元后，而图(b)和(d)中系统光阑则在第 3 组元之前。由此可以看出，专家系统可以得到满足设计要求的多种结构类型，设计者可以根据自己的需要从中进行选择，这进一步证明了本文建立的专家系统可在复杂变焦系统的智能化设计中发挥有效的作用。



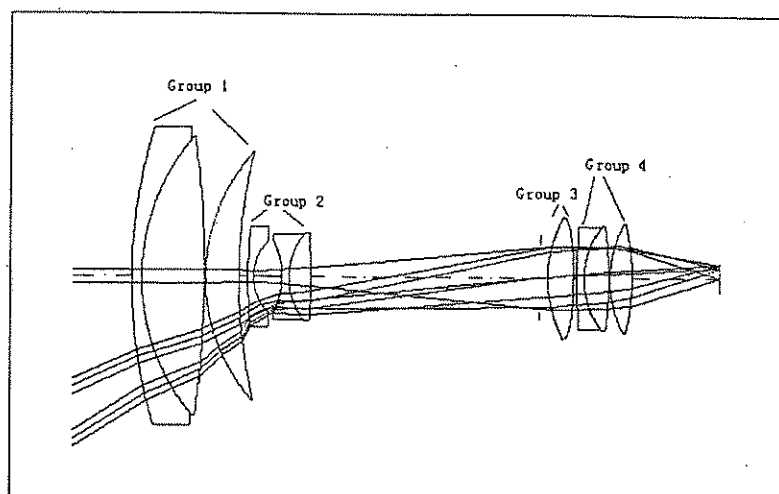
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5-11 自动生成的 $f/10-140\text{mm}$ 变焦摄像机初始结构

5.4 本章小结

本章提出利用拉格朗日乘子法,以获得光滑的变焦凸轮曲线为目的,对包括多组元全动型复杂变焦方式在内的各种变焦镜头的高斯光学参数进行自动优化设计,在优化中将每个组元的 F 数均限制在合理的数值范围内;通过分析 1900 余个变焦镜头专利,构造了含有 7000 多镜头组元的数据库;建立了专家系统,可以根据高斯光学设计中对各组元视场、孔径的要求,从数据库中自动选取合适的组元结构,从而成功地实现了对变焦光学系统初始结构的自动生成。设计实例表明该专家系统可以根据变焦系统的光学特性要求,自动生成多种不同的初始结构供设计者参考,从而有效地提高对这类系统设计的智能化程度。。

有关论文已在《光学学报》和《计算物理》上发表,2003 年 10 月在法国 St. Etienne 由欧洲光学学会(EOS)和 SPIE 联合举办的 Optical System Design 国际学术会议上介绍了本研究成果,引起了与会专家学者的广泛关注,国际著名光学设计专家 Robert E. Fischer 和 Lionel Baker 表示本工作为变焦系统的智能化设计提出了一种有益的解决方案。美国著名的 Optical Research Associates 公司的创始人之一 Tom Harris 也向我们索取论文。

第六章 结论与展望

提高光学 CAD 软件的智能化程度和光学设计的自动化程度是一项具有重要理论意义和广泛应用前景的工作。本文在国家自然科学基金项目的支持下, 针对该领域中的全局优化算法、玻璃类离散变量优化方法、在优化进程中自动增减光学元件的机制、以及变焦镜头初始结构的自动生成等热点问题开展了研究工作。

论文取得的创新性成果主要包括以下几个方面:

1、从两个方面对基于逃逸函数的全局优化算法做了重要改进: ①基于这种全局优化的运行是由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成的特点, 创造性地提出了搜索最佳阻尼因子和解向量的最优长度两个搜索机制, 提高了各个局部优化的收敛速度; ②通过大量实验确定了逃逸函数中的控制参量的最佳缺省取值, 保证了逃逸过程的高效高速。上述改进大大提高了逃逸函数全局优化算法的效率, 使其完全满足了实用要求。在算法研究的基础上, 成功地研制了国内第一个实用化的复杂光学系统全局优化模块, 并成功地应用于 GOLD 软件。这方面的工作被逃逸函数算法的创始人, 日本著名光学设计专家一色真幸教授称赞为“在理论和实际两个方面发展和完善了算法”。

2、创造性地采用镜头形态参数 W 和 S 做为判据, 提出国际上第一个不含随机性算法、可以在光学系统的优化进程中根据需要自动增减光学元件的机制。通过自行设计的优化试验进一步验证了该对参数可以有效地评价光学系统结构形式的优劣, 即: 有较小 W 和 S 值的系统一般具有较好的像差平衡性质, 有提供良好的成像质量的潜力。理论分析和大量的设计实例表明, 本文提出的机制可以在需要时准确找出插入新增光学元件的“最佳”位置, 也能够自动判别系统中可能存在的冗余元件。进一步的实验还表明, 采用该机制优化得到的设计结构通常具有较小的造成像差不平衡的“内应力”, 从而降低了对加工、装配误差的敏感程度, 具有较好的制造性能。介绍本项研究成果的论文被国际光学界著名刊物 Applied Optics 的审稿专家评为: “作者对此重要的问题提出了一个崭新的和有效的方案”。

3、提出了基于神经网络的玻璃类离散变量优化模型。将神经网络优化模型的能量函数极小值对应于光学系统约束条件下评价函数的极值, 当采用指定的玻璃品种且

系统色差满足要求时, 能量函数取极小值, 从而完成对玻璃材料的智能化选取。建立了基于中国玻璃牌号的小型玻璃库, 大大减少了网络中神经元总数, 提高了优化的收敛速度。通过设计实例验证了算法的可行性。

4、首次建立了可以自动生成变焦光学系统初始结构的专家系统。提出了以获得光滑的变焦凸轮曲线为目的、同时将各组元的 F 数控制在合理范围内的优化思路, 应用拉格朗日乘子法实现了对包括多组元全动型复杂变焦方式在内的各种变焦镜头的高斯光学参数的自动优化设计。通过分析近两千个变焦镜头专利, 构造了含有七千多个镜头组元的数据库, 在此基础上建立了专家系统, 可以根据高斯光学设计中对各组元视场、孔径的要求, 从数据库中自动选取合适的镜头组元结构, 生成变焦光学系统的初始结构。设计实例表明本专家系统可以根据变焦系统的光学特性要求, 自动生成多种不同的初始结构供设计者参考, 从而有效地提高对这类系统设计的智能化程度。有关论文国际光学系统设计学术会议上发表时, 得到了与会的国际光学设计专家的关注和称赞。

本文针对光学设计中所存在的问题, 在几个方面提出了具有实用价值的算法及机制, 为验证算法编制的试验程序有效地提高了光学设计软件的优化能力和智能化程度, 已经可以用来解决实际问题。笔者已经利用它们成功地完成了一些实际光学系统的设计。其中, 为国内某大型光学企业所设计的 $f24\sim85\text{mm}$ 变焦照相镜头, 在满足用户所提出的各项性能指标要求的同时, 有效地控制了系统中的使用的玻璃种类和元件数目; 为本系开展增强现实技术研究设计的 $36^\circ\times27^\circ$ 透视式头盔显示目视光学系统, 体积小、重量轻, 能够同时清晰地观察外部真实世界和计算机生成的虚拟场景, 并可以通过调焦将虚拟物体成像在 0.5 米到无穷远; 为研制新型虚拟现实头盔显示器设计的目视光学系统, 以目镜系统与中继系统相耦合的方式实现了大出瞳距离、大视场角和长后工作距, 采用了阵列式光学元件实现局部高分辨率视景图像的插入, 提高了眼睛注视方向的图像分辨率; 为微型飞行器所研制的对地侦查微小光学成像系统, 结构紧凑, 重量仅有 0.12 克。

本文在逃逸函数全局优化算法方面的研究成果已成功地应用于本校研制的 GOLD 光学 CAD 软件并已在国内推广应用。相关项目《军用光电系统智能化自动光学设计的研究》在 2001 年的成果验收中, 被验收专家组评为“研制的光学系统智能化自动设计软件包具有国际先进水平, 并已向国防科研和光学工业的众多单位推广应用, 在国家

重点武器装备的设计研制中发挥了重要作用，取得了明显的社会效益和经济效益。”

光学系统的智能化设计优化方法研究是一项长期的工作，本文研究的一些算法也需要不断改进和完善，今后的工作包括：

1、研究采用不同类型评价函数时逃逸函数中的控制参量 H 和 W 的最佳取值。如果能够找到某种办法粗略探测当前局部极小值附近评价函数的“地形地貌”，用来指导逃逸函数中的控制参量的选取，则可望进一步提高逃逸过程的效率，使该算法能够在短时间内找到更多、更好的解。

2、为了进一步提高自动增减光学元件机制的可靠性和普适性，可以考虑将镜头形态参数 W 和 S 与系统三级像差等其它参数相结合，提出更为精确的判据。

3、在神经网络优化模型的能量函数中加入成本控制函数项，避免采用大量镱玻璃，以提高设计结果的经济性。

4、将算法研究成果尽快应用于 GOLD 软件，以满足国内用户的需求。

参 考 文 献

- [1] M. J. Langford. Lens trends. *Industrial Photography*. 33(8), 1984: 6
- [2] 袁旭沧. 光学设计. 北京: 北京理工大学出版社, 1988
- [3] 袁旭沧. 应用光学. 北京: 国防工业出版社, 1988
- [4] V. Gerbig, A. W. Lohmann. Is lens design legal? *Appl. Opt.* 28(15), 1989: 5198-5199
- [5] P. Clark. Lenses by design (problems & solutions). *Optics & Photonics News*. 2(11), 1991: 16-22
- [6] 袁旭沧. 现代光学设计方法. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- [7] Milton Laikin. *Lens design*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995
- [8] A. Walther. Teaching the theory of real lenses. *American Journal of Physics*. 64(9), 1996: 1161-1165
- [9] M. G. Tomilin, O.Y. Neverov, G. Sines. The first lenses of the ancients. *J. Opt. Tech.* 64(11), 1997: 1066-1072
- [10] Robert R. Shannon. *The art and science of optical design*. London: Cambridge University Press, 1997
- [11] D. J. Lovell. Commercially available computerized lens design programs. *Laser Focus*. 20(8), 1984: 98-109
- [12] 王永仲. 光学设计与微型计算机. 北京: 国防科技大学出版社, 1986
- [13] A. W. Lohmann. Scaling laws for lens systems. *Appl. Opt.* 28(23), 1989: 4996-4998
- [14] P. D. Lin, T. T. Liao. Skew ray tracing and sensitivity analysis of geometrical optics. *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 122(2), 2000: 338-348
- [15] S. S. 雷欧. 工程优化原理及应用. 北京: 北京理工大学出版社, 1990
- [16] 万耀青. 最优化计算方法常用程序汇编. 北京: 工人出版社, 1983
- [17] 南京大学数学系计算数学专业. 光学系统自动设计中的数值方法. 北京: 国防工业出版社, 1976
- [18] P. N. Robb. Analytic merit function based on Buchdahl's aberration coefficients. *J. Opt. Soc. Am.* 66(10), 1976: 1037-1041.
- [19] B. B. Ivan. Mathematical possibility of certain systems in geometrical optics. *J. Opt. Soc. Am. A*. 11(11), 1994: 2905-2914
- [20] G. W. Forbes, J. K. Wallace. Can the bounds to system performance in geometrical optics be attained? *J. Opt. Soc. Am. A*. 12(9), 1995: 2064-2071
- [21] M. Szilagyi, P. H. Mui. Symmetries in geometrical optics: theory. *J. Opt. Soc. Am. A*. 12(12), 1995: 2753-2759
- [22] M. Szilagyi, P. H. Mui. Symmetries in geometrical optics: applications. *J. Opt. Soc. Am. A*. 12(12), 1995: 2760-2766
- [23] J. Nakagawa. Method for composing starting system in lens design. *Optik*. 100(11), 1995: 29-31
- [24] J. Nakagawa. Composition of new lens systems. *Optik*. 101(3), 1996: 110-112
- [25] M. De. Synthesis of optical systems - structural development and design. *J. Opt.* 27(3), 1998: 95-104
- [26] Darko Vasiljevic. *Classical and evolutionary algorithms in the optimization of optical systems*. London: Kluwer Academic Publishers. 2002

- [27] C. G. Wynne, P. M. J. H. Wormell. Lens design by computer. *Appl. Opt.* 2(12), 1963: 1233-1238
- [28] J. Meiron. Damped least square method for automatic lens design. *J. Opt. Soc. Am.* 55(9), 1965: 1105-1109
- [29] D. P. Buchele. Damping factor for the least squares method of optical design. *Appl. Opt.* 7(12), 1968: 2433-2435
- [30] D. C. Dilworth. Automatic lens optimization: recent improvements. In *1985 Intl. Lens Design Conf.* Duncan T. Moore, William H. Taylor, Eds., Proc. SPIE. 554, 1985: 191-196
- [31] M. J. Kidger. Use of the Levenberg-Marquardt (damped-least-squares) optimization method in lens design. *Opt. Eng.* 32(8), 1993: 1731-1739.
- [32] H. Matsui, K. Tanaka. Determination method of an initial damping factor in the damped least squares problem. *Appl. Opt.* 33(13), 1994: 2411-2418
- [33] B. Brixner, M. M. Klein. Optimization experiments with a double Gauss lens. *Opt. Eng.* 27(5), 1988: 420-423
- [34] B. Brixner, M. M. Klein. Optimization to eliminate two lens elements that have undesirable shapes. *Opt. Eng.* 27(12), 1988: 1027-1030
- [35] D. Sturlesi, D. C. O'Shea. Global view of optical design space. *Opt. Eng.* 30(2), 1991: 207-218
- [36] M. A. Gan, D. D. Zhdanov, V. V. Novoselskiy, S. I. Ustinov, A. O. Fedorov, I. S. Potyemin. DEMOS: state-of-the-art application software for design, evaluation, and modeling of optical systems. *Opt. Eng.* 31(4), 1992: 696-700
- [37] J. Maxwell, C. C. Hull. Multidimensional quadratic extrapolation method for the correction of aberrations in lens systems. *Appl. Opt.* 31(13), 1992: 2234-2240
- [38] T. Kuper. Global optimization finds alternative lens designs. *Laser Focus World.* 28(5), 1992: 193-195
- [39] G. Forbes, A. Jones. Global optimization in lens design. *Optics & Photonics News.* 3(3), 1992: 22-26, 28-29
- [40] D. Shafer. How to optimize complex lens designs. *Laser Focus World.* 29(1), 1993: 135-136, 138.
- [41] R. R. Shannon. Teaching lens design. *Opt. Eng.* 32(8), 1993: 1722-1725
- [42] M. Laikin. The future of optical design. *Opt. Eng.* 32(8), 1993: 1729-1730
- [43] W. Woltche. Major landmarks from the century of anastigmatic lens design. *Opt. Eng.* 32(8), 1993: 1740-1749
- [44] J. Basu, L. Hazra. Role of line search in least-squares optimization of lens design. *Opt. Eng.* 33(12), 1994: 4060-4066
- [45] J. Sakin, L. Sakin. Basic theory of a four-lens optical system design. *Appl. Opt.* 35(4), 1996: 572-581
- [46] S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt, J. M. P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 1983: 671-679
- [47] D. Vanderbilt and S.G. Louie. A Monte Carlo simulated annealing approach to optimization over continuous variables. *J. Comp. Phys.* 56, 1984: 259-271
- [48] G. K. Hearn. Generalized simulated annealing optimization used in conjunction with

- damped least squares techniques. In *Recent Trends in Optical Systems Design and Computer Lens Design Workshop*. Robert E. Fischer, Carmina Londono, Eds., Proc. SPIE. 766, 1986: 283-284
- [49] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller, and E. Teller. Equations of calculation by fast computing machines. *Journal of Chemical Physics*. 21(6), 1953: 1087-1092
- [50] G. K. Hearn. Design optimization using generalized simulated annealing. In *Current Developments in Optical Engineering II*. Robert E. Fischer, Warren J. Smith, Eds., Proc. SPIE. 818, 1987: 258-264
- [51] S. W. Weller. Simulated annealing-What good is it? In *Current Developments in Optical Engineering II*. Robert E. Fischer, Warren J. Smith, Eds., Proc. SPIE. 818, 1987: 265-280
- [52] G. K. Hearn. Practical use of generalized simulated annealing optimization on microcomputers. In *1990 Intl Lens Design Conf*. George N. Lawrence, Ed., Proc. SPIE. 1354, 1990: 186-191
- [53] V. K. Viswanathan, I.O. Bohachevsky, T.P. Cotter. An attempt to develop an intelligent lens design program. In *1985 Intl. Lens Design Conf*. Duncan T. Moore, William H. Taylor, Eds., Proc. SPIE. 554, 1985: 10-17
- [54] A. S. Fraser. Simulation of genetic systems by automatic digital computers. I. Introduction. *Aust. J. Biol. Sci.* 10, 1957: 484-491
- [55] A. S. Fraser. Simulation of genetic systems by automatic digital computers. II. Effects of linkage or rates of advance under selection. *Aust. J. Biol. Sci.* 10, 1957: 492-499
- [56] J. Holland. *Adaptation in natural and artificial system*, 2nd edition, Cambridge, Massachusetts: MIT press, 1992
- [57] D. E. Goldberg. *Genetic algorithm in search, optimization & machine learning*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989
- [58] 陈国良. 遗传算法及其应用. 北京: 人民邮电出版社, 1996
- [59] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002
- [60] 李敏强. 遗传算法的基本理论与应用. 北京: 科学出版社, 2002
- [61] X. Chen, K. Yamamoto. Genetic algorithm and its application in lens design. In *Current Developments in Optical Design and Engineering VI*. Robert E. Fischer, Warren J. Smith, Eds., Proc. SPIE. 2863, 1996: 216-221.
- [62] X. Chen, K. Yamamoto. An experiment in genetic optimization in lens design. *J. Mod. Opt.* 44(9), 1997: 1693-1702
- [63] K. E. Moore. Algorithm for global optimization of optical systems based on genetic competition. In *Optical Design and Analysis Software*. Richard C. Juergens, Ed., Proc. SPIE. 3780, 1999: 40-47
- [64] I. Ono, S. Kobayashi, K. Yoshida. Optimal lens design by real-coded genetic algorithm using UNDX. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 186, 2000: 483-397
- [65] D. Sturlesi, D. C. O'Shea. The search for a global minimum in optical design. In *Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics*. Robert E.

- Fischer, Harvey M. Pollicove, Warren J. Smith, Eds., Proc. SPIE. 1168, 1989: 92-106
- [66] D. Sturlesi, D. C. O'Shea. Future of global optimization in optical design. In *1990 Intl Lens Design Conf.* George N. Lawrence, Ed., Proc. SPIE. 1354, 1991: 54-68
- [67] R. R. Shannon. 1989 trends in lens design. *Laser Focus World*. 25(1), 1989: 144
- [68] T. Nouri, H. Buczek. Lens-design software has wide capability range. *Laser Focus World*. 26(11), 1990: 73-74
- [69] K. Garcia. Complex designs demand optical engineering code. *Laser Focus World*. 32(8), 1996: 5, 8-9
- [70] D. Zankowsky. Programs ease optical-system design. *Laser Focus World*. 32(11), 1996: 175-176, 180-181
- [71] M. Thomas. Lens design and illumination software team up. *Laser Focus World*. 35(6), 1999: 133-134, 136
- [72] J. Cobb. Lens-design programs serve both novice and expert. *Laser Focus World*. 35(9), 1999: 147-148, 150
- [73] T. Kuper. Global optimization finds alternative lens designs. *Laser Focus World*. 28(5), 1992: 193-195
- [74] D. S. Dewald. Using ZEMAX image analysis and user-defined surfaces for projection lens design and evaluation for digital light processing/sup TM/ projection systems. *Opt. Eng.* 39(7), 2000: 1802-1807
- [75] 王涌天, 何定, 张思炯. GOLD—新一代复杂光学系统分析优化软件包. *光电工程*. 24(3), 1997: 42-48
- [76] K. Tanaka. Recent development of zoom lenses. In *Zoom Lenses II*. Ellis I. Betensky, Allen Mann, Iain A. Neil, Eds., Proc. SPIE. 3129, 1997: 2-22
- [77] Zoom Lenses. The International Society for Optical Engineering, Allen Mann, Ed., Proc. SPIE. 2539, 1995
- [78] Zoom Lenses II. The International Society for Optical Engineering, Ellis I. Betensky, Allen Mann, Iain A. Neil, Eds., Proc. SPIE. 3129, 1997
- [79] Zoom Lenses III. The International Society for Optical Engineering, Iain A. Neil, Takanori Yamanashi, Eds., Proc. SPIE. 4487, 2001
- [80] 电影镜头设计组. 电影摄影物镜光学设计. 北京: 中国工业出版社. 1971
- [81] 陶纯堪. 变焦距光学系统变焦方程. *科学通报*. 22, 1977: 207-213
- [82] 金春水. 正组补偿变焦距镜头的焦距输出函数. *光学精密工程*. 4(4), 1996: 11-15
- [83] 张波, 李林, 安连生, 黄一帆, 张丽琴. 等倍变焦全动型变焦距物镜理论分析. *光学技术*. 27(3), 2001: 226-228
- [84] M. Isshiki, H. Ono, K. Hiraga, J. Ishikawa, S. Nakadate. Lens design: Global optimization with escape function. *Optical Review*. 2(6), 1995: 463-470
- [85] T. H. Jamieson. *Optimization Techniques in Lens Design*. London: Adam Hilger Ltd. 1971
- [86] M. Yoshikazu. Wide-angle lens. Japanese Patent 8,029,680. 1996
- [87] S. Matsui. Wide angle photographic lens. U.S. Patent 4,099,850. 1978
- [88] I. Mori. Retrofocus type photographic lens. U.S. Patent 3,583,791. 1971
- [89] N. Jihei. Small-sized retrofocus type wide-angle lens. Japanese Patent 57,197,598.

1982

- [90] G. Klemt, K. Macher. Wide-angle photographic or cinematographic objective. U.S. Patent 3,016,799. 1962
- [91] G. Lange. Lens system for a photographic objective. U.S. Patent 2,780,139. 1957
- [92] H. H. Hopkins. Canonical and real-space coordinates used in the theory of image formation. *Applied Optics and Optical Engineering*. Academic Press. 9, 1983: 307-369
- [93] Y. Wang, H. H. Hopkins. Ray-tracing and aberration formulae for a general optical system. *J. Mod. Opt.* 39, 1992: 1897-1938
- [94] W. B. King. A direct approach to the evaluation of the variance of the wave aberration. *Appl. Opt.* 7, 1968: 489-494
- [95] T. G. Kuper, T. I. Harris, R. S. Hilbert. Practical lens design using a global method. *Int. Optical Design Conf. Technical Digest* (Optical Society of America, Washington D.C.), 1994: 67-70
- [96] Lambda Research Corporation. Global optimization. *OSLO Optics Reference Manual* (Littleton, MA), 2001: 220-226
- [97] E. Betensky. Postmodern lens design. *Opt. Eng.* 32(8), 1993: 1750-1756
- [98] D. W. Williamson. The monochromatic quartet explained. *Lens Design*, W. J. Smith, Ed., *Critical Reviews CR41* (SPIE Press, Bellingham, WA), 1992: 72-87
- [99] J. M. Sasian, M. R. Descour. Power distribution and symmetry in lens system. *Opt. Eng.* 37(3), 1998: 1001-1004
- [100] R. Ogawa, et.al. Zoom lenses. U. S. Patent 4,185,893. 1980
- [101] Optical Research Associates. Macro-PLUS. Chapter 11 in *CODE V Reference Manual* (Optical Research Associates, Pasadena, California), 2003
- [102] W. Mert. The Zeiss Index of photographic lenses (the Central Air Documents Office, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, OH, 1950). Cooke anastigmat (by Harold Dennis Taylor): 339
- [103] S. Nakamura. Wide angle lens system. U.S. Patent 4,155,629. 1979
- [104] A. W. Tronnier. Photographic objective lens of high speed with wide field of view. U.S. Patent 2,955,513. 1960
- [105] K. Kokichi, T. Yoshiko. Projection exposing method. Japanese Patent 10,319,603. 1998
- [106] A. Shibayama. High zoom ratio zoom lens. U. S. Patent 5,694,253. 1997
- [107] P. N. Robb. Selection of optical glasses. In *Intl. Lens Design Conf.* Duncan T. Moore, William H. Taylor, Eds., *Proc. SPIE*. 554, 1985: 60-75
- [108] P. N. Robb. Selection of optical glasses.1: two materials. *Appl. Opt.* 24(12), 1985: 1864-1877
- [109] W. Besenmatter, C. Zeiss. How many glass types does a lens designer really need? In *International Optical Design Conference 1998*. Leo R. Gardner, Kevin P. Thompson, Eds., *Proc. SPIE*. 3482, 1998: 294-305
- [110] I. Ono, Y. Tatsuzawa, S. Kobayashi, K. Yoshida. Designing lens system taking account of glass selection by real-coded genetic algorithm. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 3, 1999: 592-597

- [111] 程相君, 王春宁等. 神经网络原理及其应用. 北京: 国防工业出版社, 1995
- [112] J. J. Hopfield, D. W. Tank. Computing with neural circuits: a model. *Science*. 233, 1986: 625-633.
- [113] J. Macdonald, A. J. Breese, N. L. Hanbury. Optimization of a lens design using a neural network. In *Applications of Artificial Neural Networks IV*. Steven K. Rogers, Ed., Proc. SPIE. 1965, 1993: 431-441
- [114] B. H. Walker. The 20% rule: selecting optical glass. *Opt. Spectra*. Dec. 1978: 42-45
- [115] S. Zhang, R. R. Shannon. Lens design using a minimum number of glasses. In *Current Developments in Optical Design and Optical Engineering IV*. Robert E. Fischer, Warren J. Smith, Eds., Proc. SPIE. 2263, 1994: 2-9
- [116] J. Tesar. Using small glass catalogs. *Opt. Eng.* 39 (7), 2000: 1816-1821
- [117] A. D. Clark. Zoom lenses. Monographs in applied optics. No.7. London: Adam Hilger Ltd. 1973
- [118] C. C. Allen. U. S. Patent 696,788. 1902
- [119] H. J. Gramatzki. British Patent 449,434. 1935
- [120] R. Richter. U. S. Patent 2,078,586. 1937
- [121] 刘崇进, 史光辉. 机械补偿法变焦距镜头三个发展阶段的概况和发展方向. *应用光学*. 2, 1992: 1-5
- [122] R. E. Aldrich. Three elements infrared optically compensated two-position zooms for commercial FLIRs. In *Zoom Lenses*. Allen Mann, Ed., Proc. SPIE. 2539, 1987: 87-107
- [123] P. Angenieux. U.S. Patent 2,847,907, 1958
- [124] L. Bergstein. General theory of optically compensated varifocal systems. *J. Opt. Soc. Am.* 48(3), 1958: 154-172
- [125] K. Tanaka. Paraxial analysis of mechanically compensated zoom lenses. I: four-lens type. *Appl. Opt.* 21(12), 1982: 2174-2183
- [126] C. Tao. Varifocal differential equation theory of zoom lens. In *Zoom Lenses*. Allen Mann, Ed., Proc. SPIE. 2539. 1995: 168-179
- [127] 北京 608 厂光学设计研究室. 双组联动型变焦系统高斯光学系统介绍. *电影光学*. 10, 1977: 1-18
- [128] 薛鸣球. 变焦距物镜的高斯光学. *电影光学*. 3, 1978: 1-15
- [129] K. Tanaka. Recent development of zoom lenses. In *Zoom Lenses II*. Ellis I. Betensky, Allen Mann, Iain A. Neil, Eds., Proc. SPIE. 3129, 1997: 12-22
- [130] 王琦, 吴强, 黄惠杰, 钟伯亮. 多组元全动型变焦距物镜高斯光学. *光学学报*. 19(6), 1999: 830-834
- [131] Y. Wang, L. Zhang, L. Li. Method of determining Gaussian parameters for zoom systems with multiple moving lens groups. In *International Optical Design Conference 2002*. Paul K. Manhart, Jose M. Sasian, Eds., Proc. SPIE. 4832, 2002: 122-125
- [132] 史荣昌. 矩阵分析. 北京: 北京理工大学出版社, 1995
- [133] T. H. Jamieson. Thin-lens theory of zoom systems. *Optica Acta*. 17(8), 1970: 565-584
- [134] S. C. Park, R. R. Shannon. Zoom lens design using lens modules. *Opt. Eng.* 35(6),

- 1996: 1668-1676
- [135] K. Tanaka. A novel configuration of zoom lens. *Optik*. 73(4), 1986: 157-159
 - [136] K. Tanaka. A novel configuration of compact zoom lenses, *Optik*. 81(1), 1988: 33-34
 - [137] A. Cox, A survey of zoom lens. In *Zoom Lenses II*. Ellis I. Betensky, Allen Mann, Iain A. Neil, Eds., Proc. SPIE. 3129, 1997: 2-12
 - [138] K. Tanaka. Zooming-component loci of mechanically compensated zoom lenses. In *Selected Papers from International Conference on Optics and Optoelectronics '98*. Kehar Singh, Om P. Nijhawan, Arun K. Gupta, A. K. Musla, Eds., Proc. SPIE. 3729. 1999: 452-457

攻读博士学位期间发表论文、参加科研项目及获奖情况

已发表论文:

- (1) Xuemin Cheng, Yongtian Wang, Qun Hao. Expert system for zoom lens design, In *Optical Systems Design 2003*. SPIE Vol.5249
- (2) 王琦, 程雪岷, 王涌天, 王光宇. 变焦距镜头电子变焦模式, 北京理工大学学报. 23(3), 2003: 386-388,393
- (3) Xuemin Cheng, Yongtian Wang, Hao Qun, Jose Sasian. Automatic element addition and deletion in lens optimization. *Appl. Opt.* 42(7), 2003: 1309-1317
- (4) 程雪岷, 王光宇, 张丽琴, 王涌天, 王琦. 变焦距镜头初始结构智能化设计方法. 计算物理. 19(6), 2002: 521-526
- (5) Xuemin Cheng, Yongtian Wang, Qun Hao. Study on Automatic optical addition or deletion. SPIE Vol.4927, 2002: 90-100 (invited paper)
- (6) 王琦, 王光宇, 程雪岷, 王涌天. 变焦距镜头高斯光学设计的新方法. 光学学报. 22(8), 2002: 983-988
- (7) 张丽琴, 王涌天, 李林, 程雪岷等. 基因算法在光学系统优化中的应用. 光学学报. 22(1), 2002: 74-78.
- (8) 王涌天, 程雪岷, 刘慧兰, 郝群, 一色真幸. 复杂光学系统的全局优化. 光学学报. 21(7), 2001: 835-840
- (9) 程雪岷, 王涌天, 郝群等. 虚拟漫游机. 仪器仪表学报. 22(3), 2001: 322-324
- (10) 程雪岷, 郝群, 王涌天. 基于虚拟现实的虚拟乐队的实现. 现代光学仪器. 4, 2001: 35-37

已投稿论文:

- (1) Xuemin Cheng, Yongtian Wang, Qun Hao, Jose Sasian. Expert system for design of zoom systems with multiple moving lens groups. (Submitted to *Optical Engineering*)
- (2) Xuemin Cheng, Yongtian Wang, Qun Hao, Masaki Isshiki, Efficiency studies on escape function algorithm for automatic optical design. (Submitted to *Optik*)
- (3) 程雪岷, 郝群, 王涌天. 新型插入式大视场头盔显示器光学系统设计. (投往光学学报)

参加科研项目及完成情况:

- (1) 作为主要研究人员参加了国防预研项目《军用光电系统智能化自动光学设计的研究》，成果通过中国兵器工业集团验收，被验收专家组评为“研制的光学系统智能化自动设计软件包具有国际先进水平，并已向国防科研和光学工业的众多单位推广应用，在国家重点武器装备的设计研制中发挥了重要作用，取得了明显的社会效益和经济效益。”（2001 年）；
- (2) 作为主要研究人员参加了国家自然科学基金项目《复杂光学系统全局优化技术的研究》（项目批准号 69778019）的研究工作，项目完成情况被基金委专家组评为优（2001 年）；
- (3) 作为主要研究人员参加了国家自然科学基金项目《变焦镜头的智能化设计方法研究》（项目批准号 69978001）的研究工作，项目完成情况被基金委专家组评为特优（2003 年）。

获奖情况:

获得了国际工程光学学会（SPIE）颁发的 2003 年度 Michael Kidger Memorial Scholarship。该奖学金由国际光学学会 SPIE 和 Kidger 公司共同管理，致力于选拔优秀的光学设计人才，促进光学设计研究的发展。评审委员会由来自于美国、澳大利亚、英国、德国、爱尔兰、瑞典、芬兰、波兰各国的著名光学专家组成，每年在全球范围内评选出一个奖学金获得者。以往各届入选的均是西方国家大学著名光学研究中心的博士生，此次为我国大学的学生首次荣获该奖学金。2003 年 9 月底赴法国 St. Etienne 参加了由欧洲光学学会（EOS）和 SPIE 联合举办的 Optical Systems Design 2003 国际会议上的颁奖仪式，并在此会议上宣读论文，介绍了研究工作的最新进展。

致 谢

本论文是在王涌天研究员和郝群教授的悉心指导下完成的。王涌天老师精湛广博的才华学识和远见卓识的学者风范，以及强调科研工作创造性的指导使我终生受益，也为我今后的工作和学习指明了方向。我衷心感谢王涌天老师多年来给予的富于启发性的指导和鼓励！郝群老师孜孜不倦的敬业精神和严谨求实的治学态度，为人为学都永远是我学习的榜样。对她五年来在学业和工作上的指导和帮助，在思想和生活上无微不至的关怀和爱护表示最诚挚的感谢！

感谢国家自然科学基金对本论文工作的资助。

沈阳自动化研究所王琦研究员在变焦距光学系统优化方法方面给予我启发性的指导和教诲，在此对他的帮助深表感谢！在课题的研究过程中，教研室李林教授以及421教研室的各位老师对本论文工作给予了多方面的支持和帮助，在此一并致谢！

刘慧兰同学在逃逸函数算法的研究中付出了辛勤的劳动，张丽琴博士在变焦距光学系统优化设计的前期研究给作者很大的启发和帮助，特此向她们深表谢意。

感谢宋勇、郑祎、袁慧晶、胡晓明、纪巍、袁洁、何林等同学给予的支持和帮助！

感谢所有帮助过和始终关心着我的老师、同学和朋友！

同时我还要感谢我的父母，是他们多年的支持和关爱，使我顺利完成了论文工作。

